

LUCAS SANTIAGO GONÇALVES DE LIMA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CAMADA REFUNDIDA
NOS VALORES DE ENERGIA ABSORVIDA NOS
CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO MINI CHARPY**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

LUCAS SANTIAGO GONÇALVES DE LIMA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CAMADA REFUNDIDA NOS
VALORES DE ENERGIA ABSORVIDA NOS CORPOS DE PROVA
PARA ENSAIO MINI CHARPY**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de graduação em
Engenharia Mecânica da Faculdade de
Engenharia Mecânica da Universidade Federal
de Uberlândia, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de **Bacharel em Engenharia
Mecânica**.

Área de concentração: Usinagem não
convencional e ensaios de impacto.

Orientador: Prof. Dr. Luciano José Arantes

UBERLÂNDIA - MG

2019

LUCAS SANTIAGO GONÇALVES DE LIMA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CAMADA REFUNDIDA NOS VALORES DE ENERGIA ABSORVIDA NOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO MINI CHARPY

Trabalho de conclusão de curso
APROVADO pela Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia.

Área de concentração: Análise e gestão de
dados

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano José Arantes – FEMEC – UFU – Orientador

Profa. Dra. Rosenda Valdes Arencibia – FEMEC – UFU- Membro

Msc. Rafael Ariza Gonçalves – FEMEC – UFU - Membro

Uberlândia, 15 de fevereiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela segurança nos dias de medo e a paz nos dias de desespero.

Agradeço ao meu pai Lindomar por ser um real herói e ter me ensinado como nos traz tranquilidade ser honesto e honrado, e com o mesmo peso, agradeço minha mãe Lilian por me ensinar a ser bom, e conseguir atrair pessoas maravilhosas pro meu lado. E agradecer meu irmão Luiz Fernando, claro, por me forçar a ser um bom espelho.

Gostaria de agradecer ao professor Luciano José Arantes, pela flexibilidade (muito pelo entendimento do que é engenharia de verdade), motivação passada, também parabeniza-lo pelo empenho em fazer as coisas corretas. Gostaria de destacar a atenção dada a trabalho, muito obrigado!

Gostaria de agradecer à Universidade Federal de Uberlândia, e o Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) e a Petrobras pelos recursos disponibilizados. Além de agradecer aos professores Rosenda Valdés e Rafael Ariza, ao engenheiro Fernando Buiatti, aos técnicos Afrânio Vieira e Paulo Vitor e a amigo Fabrício Ferreira, que disponibilizaram seu tempo para contribuir com o desenvolvimento do trabalho.

Gostaria de agradecer aos amigos de verdade que pude fazer, amigos que choraram e se emocionaram ao se reencontrar no último fim de ano, todos apaixonados pela lendária equipe Manchester 92.

Por fim, minha namorada Giovanna Moraes, que me acompanhou durante toda a faculdade, nos bons momentos e também nos difíceis.

RESUMO

O processo não tradicional de usinagem por Descargas Elétricas tem sido muito estudado e utilizado pela indústria há várias décadas. Uma das características principais desse processo de usinagem é a possibilidade de usinar materiais de elevada dureza e confeccionar peças com geometrias complexas. Eletroerosão é altamente indicado na fabricação de corpos de prova Charpy, em especial, mini Charpy. Entretanto, a camada refundida, intrínseca do processo, pode ser um problema no comportamento dos resultados dos ensaios. Este trabalho tem como objetivo investigar a influência da espessura da camada refundida nos valores de energia absorvida pelos corpos de prova durante o ensaio mini Charpy. Os corpos de prova foram fabricados com seção de 1,5 mm x 1,5 mm com variações dimensional de 0,01 mm e raio de 0,08 mm com variação dimensional de 0,01 mm. O aço P110, material estudado, foi usinado por eletroersão a fio. Foram realizados diversos processos de tratamento dos corpos de prova, como lixamento, polimento e ataque químico, assim como levantamentos estatísticos de seleção dos corpos de prova, que foram medidas através de fotos obtidas via microscópio ótico com alta aproximação. Basicamente, o projeto mostra através de curvas com os valores de espessura da camada refundida obtidas relacionadas aos valores de energia absorvida, que não existe influência da espessura da camada refundida nos resultados dos ensaios mini Charpy dos corpos de prova fabricados com o aço P110 e as dimensões mencionadas acima.

ABSTRACT

Electrical Discharge Machining is a non-traditional manufacturing process that has been both very studied and used for decades. One of the main characteristics of this process is the possibility of machining high-hardness materials and creating pieces with complex geometries. EDM is highly indicated in the manufacture of Charpy test specimens, particularly for mini-size Charpy. However, the recast layer, intrinsic to the process, may be a problem to test results behavior. This work investigate the influence of recast layer thickness on the energy absorbed by the specimens during the mini-size Charpy test. The samples are 1.5 mm x 1.5 mm with dimensional variation of 0,01 mm and radius of 0,01 mm. The studied material P110 was manufactured by wire-cut. Several specimen preparation processes were carried out such as sanding, polishing and etching, as well as statistical treatment for selection of samples, which were measured through photos obtained by an optical microscope with high approximation. Basically, the study graphically displays the values of the recast layer thickness, the absorbed energy and the relation between them, showing that there is no influence of the thickness of the recast layer in the mini-size Charpy test results of samples manufactured with P110 steel and the dimensions mentioned above.

Keywords: WEDM, recast layer, mini Charpy, energy.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	2
INTRODUÇÃO	2
CAPÍTULO II	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Eletroerosão	4
2.1.1 Eletroerosão a Fio	4
2.2 Charpy	5
2.2.1 Mini Charpy	7
2.3 Camada refundida	7
CAPÍTULO III	9
METODOLOGIA	9
CAPÍTULO IV	22
RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
CAPÍTULO V	30
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	30
CAPÍTULO VI	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
APÊNDICE A	32

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho foi responder à Petrobras, financiador do projeto “mini Charpy”, se existe alguma influência da camada refundida que é gerada nos processos de eletroerosão, nos valores de energia absorvida no ensaio de impacto mini Charpy, nesse caso em corpos de prova com secção de dimensões nominais 1,5 mm X 1,5 mm e raio 0,8 mm, fabricados em aço P110.

Existem diversos processos de usinagem, com diferentes propriedades e particularidades. Esses processos são já nos seu princípio classificados como sendo processos convencionais e processos não convencionais. O processos convencionais podem ser mais facilmente identificados, uma vez que têm várias semelhanças consideráveis. Em sua totalidade, a utilização do atrito entre dois materiais de diferentes propriedades, para que um material consiga romper a resistência mecânica do outro. Os mecanismos não convencionais, diferentemente dos convencionais não acumulam semelhanças entre si, pelo contrário, obedecem cada um a critério próprio. A eletroerosão a fio, é um processo de usinagem que segue muito bem essa regra dos processos não convencionais de usinagem, pois é uma particularidade de um processo de usinagem já muito particular. A eletroerosão é um processo para fabricação de peças isoladas, no máximo para pequenas séries. A peça é submersa em um líquido, onde não existe força de corte, pois não há contato entre a ferramenta e a peça não formando as tensões comuns dos processos convencionais de usinagem (SABO, 2008). O processo de Usinagem por Descargas Elétricas é muito utilizado na usinagem de materiais de elevada dureza e condutores elétricos, difíceis de serem usinados por processos convencionais, além de permitir a confecção de geometrias bem complexas e de dimensões diminutas (ARANTES et al., 2003). Esse processo é indicado para aplicações onde se exijam alto acabamento de peças com detalhes bem refinados. Que é o caso dos corpos de prova para ensaio mini Charpy.

O ensaio mini Charpy é um modelo com dimensões reduzidas e extremamente controlado do ensaio Charpy. O ensaio Charpy ou teste de impacto Charpy, é como explícito no nome um ensaio de impacto. Esse ensaio consiste em romper o corpo de prova a partir

de um golpe desferido por um martelo pendular. A lógica de cálculo desse ensaio estabelece que a energia absorvida pelo material é a diferença entre a energia final e a energia inicial, que podem ser calculadas. Os corpos de prova para esse tipo de ensaio são normalmente na forma de prisma quadrangular com uma seção quadrada sem variações, exceto na região do entalhe, que fica ao meio da peça e serve de concentrador de tensão durante o ensaio. Para o ensaio mini Charpy, as dimensões dos corpos de prova devem ser extremamente controlados e donos de uma altíssima precisão no que diz respeito às tolerâncias dimensionais. Durante a fabricação desses corpos de prova por meio da eletroerosão a fio, gera-se devido às altas temperaturas envolvidas uma camada muito dura e muito estreita que se conhece por camada refundida. Quando observada via microscópio após ataque, apresenta coloração branca, o que a credencia a ser chamada de camada branca por alguns pesquisadores.

O aço P110, material estudado, é um aço muito utilizado nos dutos da indústria de petróleo e gás, sua composição química inclui elementos de liga como Mn, Si, Nb, Ti, Cr, Mo, V, P, S.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada uma revisão bibliográfica sobre definições, especificações e esclarecimentos associados ao projeto.

2.1 Eletroerosão

Técnicas não tradicionais de usinagem foram desenvolvidas devido à tecnologia que desenvolveu materiais os quais eram difíceis de serem usinados da forma convencional. Cabe ressaltar que o método de usinagem convencional não confronta com o método de usinagem não convencional. A escolha do método a ser desenvolvido deve se dar pelo tipo de material a ser usinado, a forma da peça, o custo econômico e a potencialidade do processo (ARANTES, 2007).

A eletroerosão é um processo que a maioria dele é não visível. Para que a eletroerosão aconteça é indispensável a presença de um fluido dielétrico e que os materiais utilizados sejam ótimos condutores de eletricidade. Na eletroerosão não existe força de corte, não existe contato entre a ferramenta (fio) e a peça, pois estão separadas por uma fenda de trabalho (gap) de 0,01 a 0,5 mm de distância (MCGEOUCH, 1988).

2.1.1 Eletroerosão a Fio

O processo de usinagem a fio possui uma diferença significativa em relação ao processo por penetração. Por usinagem a fio, um fio eletricamente carregado transpassa a peça que está submersa no líquido utilizado em um fluxo constante, decorrendo assim, descargas elétricas entre o fio e a peça, as quais cortam o material. Para possibilitar a travessia do fio, é feito antecipadamente um pequeno furo no material a ser usinado. Este corte a fio é planejado por computador, o que faz que ele seja exato (MELO, 2017).

A Figura 1 representa o diagrama do processo de eletroerosão a fio. Como visto, são duas bobinas paralelas de fios que se movimentam em conjunto para que haja movimentação do fio e duas polias paralelas para que o fio esteja sempre sobre um

determinado eixo referenciado na máquina. A peça fica presa a uma mesa que se movimenta em um plano perpendicular ao eixo do fio. Todo o processo é constantemente por um injetor de fluido dielétrico.

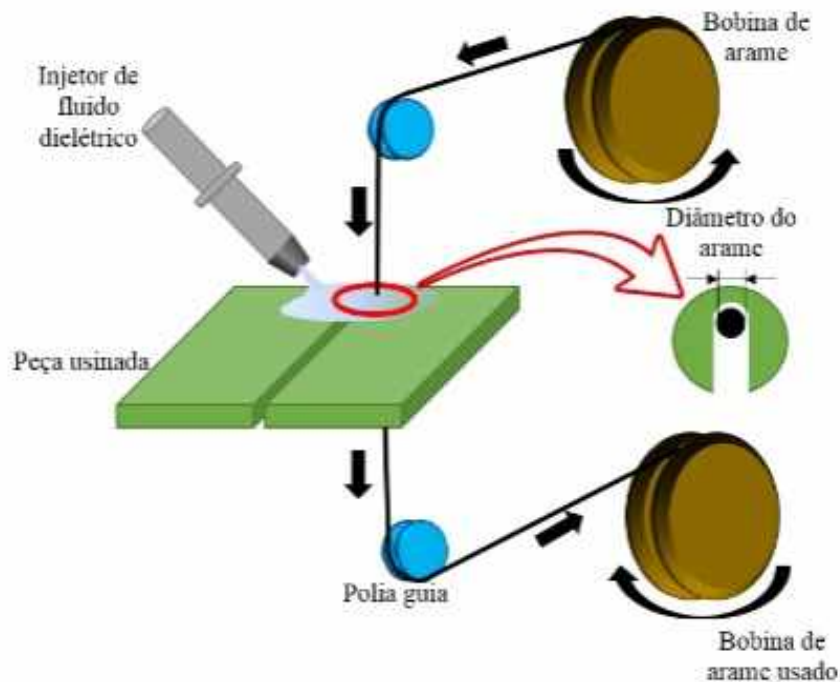


Figura 1 - Diagrama de eletroerosão a fio (ARANTES, 2019).

O processo de eletroerosão a fio é um dos processos não convencionais de usinagem mais utilizados na indústria, pois possibilita a usinagem de peças com geometrias complexas com alta precisão dimensional e bom acabamento. Os copos de prova para ensaio mini Charpy, levando em conta a tolerância dimensional de 0,01 mm, só podem ser usinados de forma a garantir essa tolerância por eletroerosão a fio.

2.2 Charpy

Embora existam ensaios mais elaborados e bem mais representativos, pela sua rapidez, baixo custo e simplicidade, o ensaio de impacto é usado em todo o mundo sendo obrigatório para teste de aceitação do material. O resultado do ensaio, isto é, a energia absorvida para romper o corpo de prova, pode ser utilizado como controle de qualidade desses materiais (COSTA, 2014).

Existem duas formas principais de ensaio de impacto, o Charpy e o Izod, sendo este último raramente utilizado hoje em dia. O ensaio de Charpy é um ensaio dinâmico utilizado para análise da fratura frágil de materiais (GARCIA, 2012).

O ensaio consiste em tentar romper, por meio de um golpe de um pêndulo oscilando, um corpo-de-prova dotado de um entalhe no centro e apoiado em suas extremidades. A energia absorvida é geralmente determinada em Joules. Esta energia absorvida é uma medida da resistência ao impacto do material (DUARTE, 2006).

O ensaio de impacto Charpy apresenta vantagens como: (a) uso de corpos-de-prova reduzidos, (b) facilidade de execução, (c) alta taxa de deformação, (d) correlação com outros ensaios de fratura e (e) economia. Por outro lado, a ausência de uma medida direta da tenacidade à fratura aplicável ao projeto tem restringido a aplicação do ensaio de impacto Charpy (KOBAYASHIK et al., 2001).

A Figura 2 apresenta esquema da máquina de impacto Charpy em suas diferentes posições. Mostrando os ângulos que e as alturas que são utilizados nos cálculos das energias final e inicial.

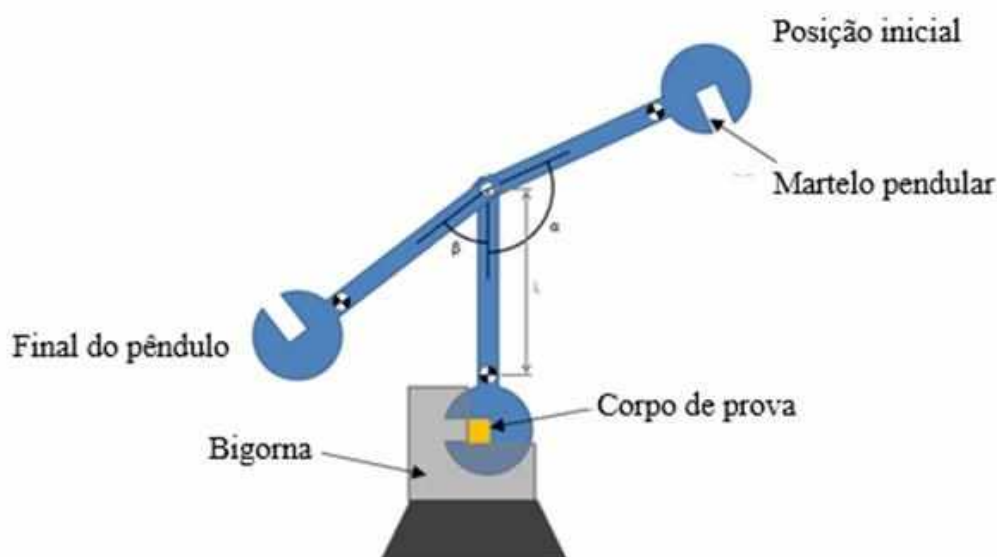


Figura 2 - Máquina de ensaio de impacto Charpy (FRANCO, 2018).

2.2.1 Mini Charpy

Os testes mecânicos convencionais requerem um volume relativamente grande de material a ser testado e, extraí-lo do componente em operação pode prejudicar sua integridade. Nessas situações, os ensaios mecânicos baseados em técnicas de ensaio em pequenos corpos de prova se apresentam como soluções eficientes para caracterizar as propriedades mecânicas dos componentes. Tais técnicas vêm sendo estudadas nas últimas décadas e podem ser classificadas como "mini testes" (LUCAS, 1983).

O ensaio mini Charpy obedece os mesmo padrões do ensaio Charpy, mas projetado de forma que possam trabalhar com tamanhos significativamente reduzidos de corpos de prova, o que estende bastante as aplicações do ensaio de impacto Charpy. A operação com volumes reduzidos de material possibilita o uso de materiais mais caros como corpos de prova.

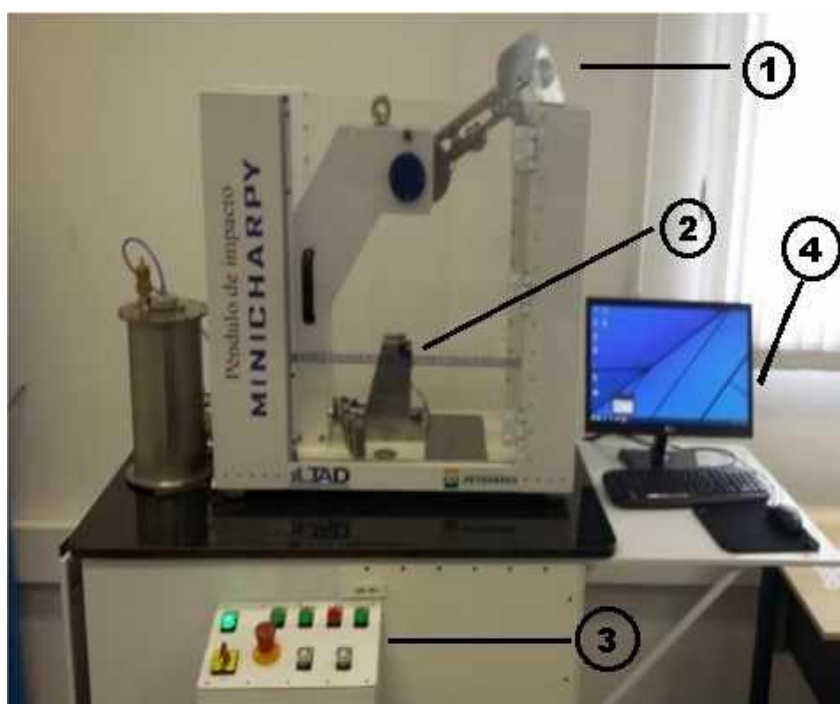


Figura 3 - Sistema completo de ensaio mini Charpy do LTAD-UFU.

A Figura 3 se trata de uma foto do mecanismo de ensaio de impacto mini Charpy do LTAD-UFU que foi desenvolvido com apoio da Petrobras. Nessa imagem é possível identificar o pêndulo (1), o suporte do corpo de prova (2), o acionamento (3) e o computador (4). Esse é um ensaio todo instrumentado, onde todos os resultados são obtidos diretamente no computador.

2.3 Camada refundida

A camada refundida é intrínseca ao processo EDM, e apesar das novas tecnologias empregadas, a natureza térmica do processo EDM impede a sua total eliminação (ARANTES, 2001).

A formação da camada refundida ocorre segundo explicação a seguir. Depois de uma descarga, forma-se uma cratera e uma certa quantidade de material fundido vai se redepositar na superfície da cratera devido à tensão superficial e efeitos de resfriamento. Esse material vai se resfriar devido às paredes frias da cratera e ao poder de refrigeração do fluido dielétrico. Essa camada tende a ser bem carbonetizada e é chamada de material refundido ou ainda “camada branca”. Abaixo da camada branca fica a área chamada de “zona afetada pelo calor” (ou ZAC). Essa área é apenas parcialmente afetada pelas altas temperaturas. A dureza da camada refundida e da ZAC, imediatamente abaixo, dependem da corrente e da frequência usadas durante a usinagem, e da capacidade de condução de calor do próprio material. A camada refundida pode afetar a estrutura e/ou a integridade da superfície usinada por EDM (LIMA, 1997).

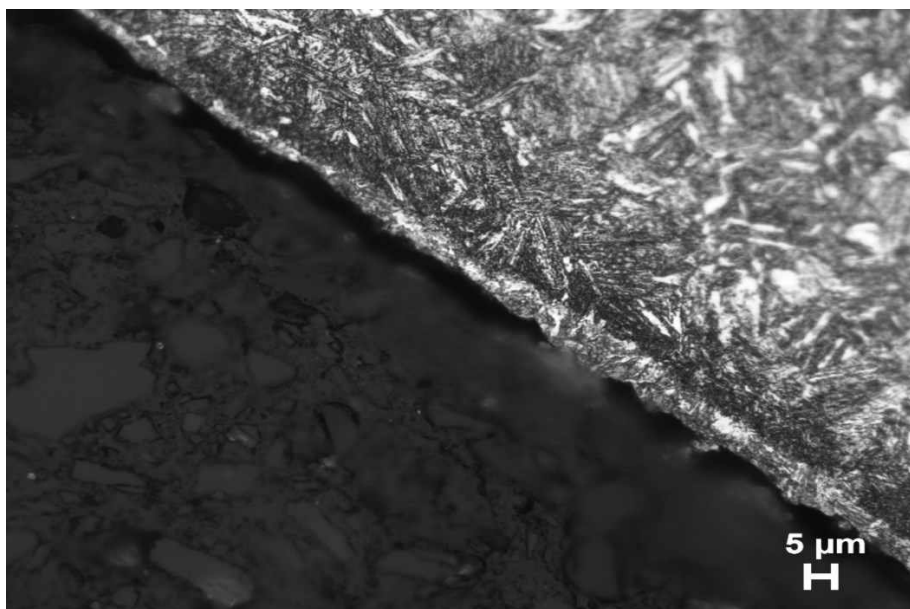


Figura 4 - Camada refundida (região mais clara na diagonal central).

A camada que aparece nos produtos da eletroerosão pode também ser chamada de camada branca, tendo como base para essa denominação as imagens dessa camada que são obtidas via microscopia ótica. Um exemplo é a imagem da Figura 4.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Inicialmente, a fim de selecionar corpos de prova que respeitassem as tolerâncias, foram fabricadas por meio da eletroerosão a fio aproximadamente 200 corpos de prova na máquina de eletroerosão a fio do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste.

A máquina de eletroerosão da Figura 5, a qual foi utilizada no trabalho é controlada eletronicamente, e a eletroerosão retorna uma precisão dimensional alta, todas os corpos de prova foram fabricadas no limite da tolerância dimensional do projeto do corpo de prova. As Figuras 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 são os desenhos de entrada da máquina para retorno dos corpos de prova.



Figura 5 - Máquina de eletroerosão GF AgieCharmilles FW 2U, LTAD-UFU.

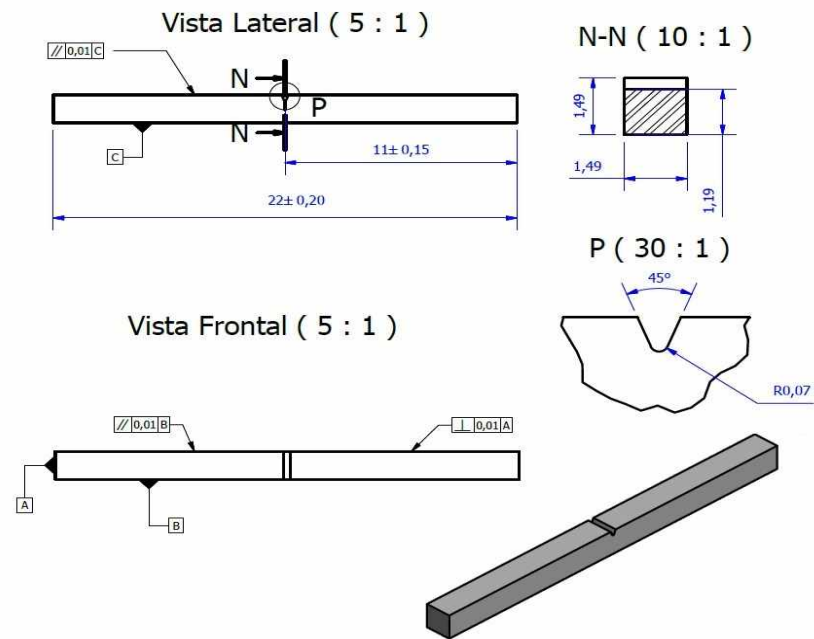


Figura 6 - Corpo de prova secção 1,49 mm x 1,49 mm, raio 0,07 mm.

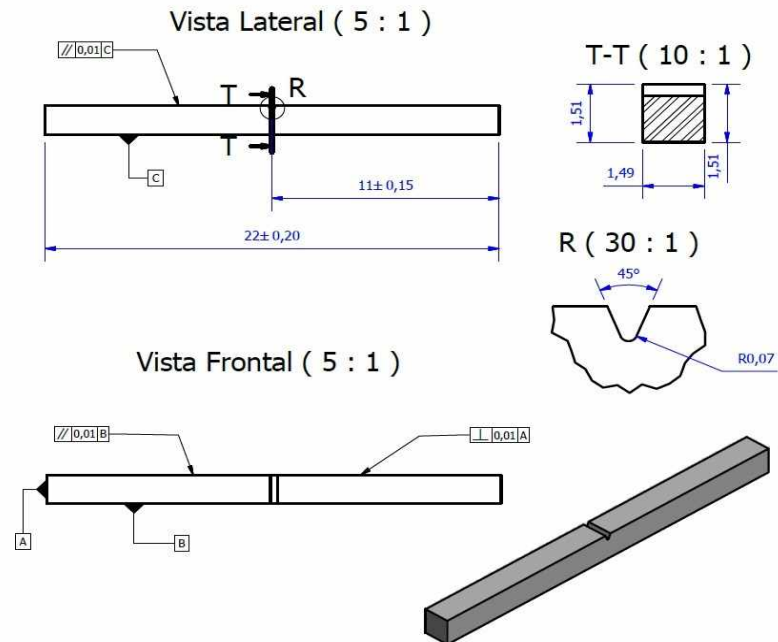


Figura 7 - Corpo de prova secção 1,51 mm x 1,49 mm, raio 0,07 mm.

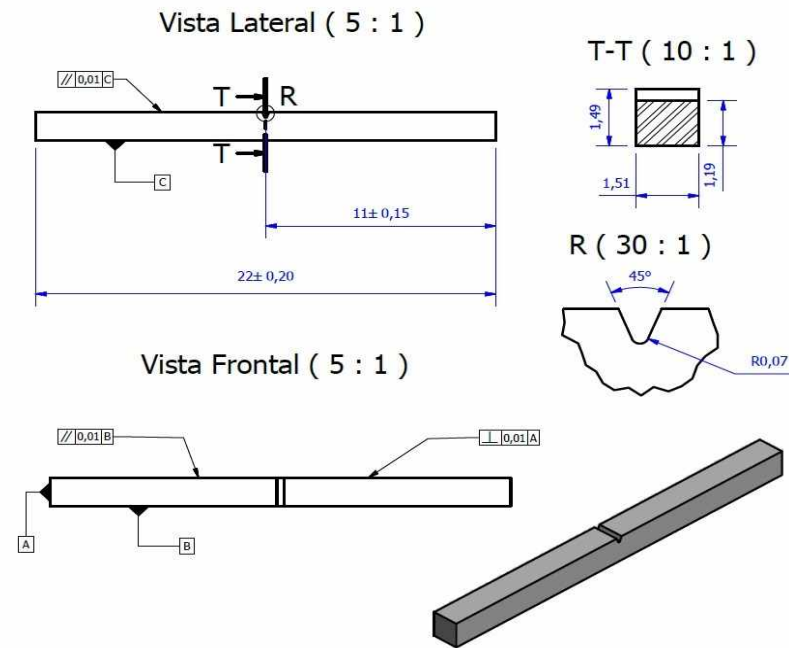


Figura 8 - Corpo de prova secção 1,49 mm x 1,51 mm, raio 0,07 mm.

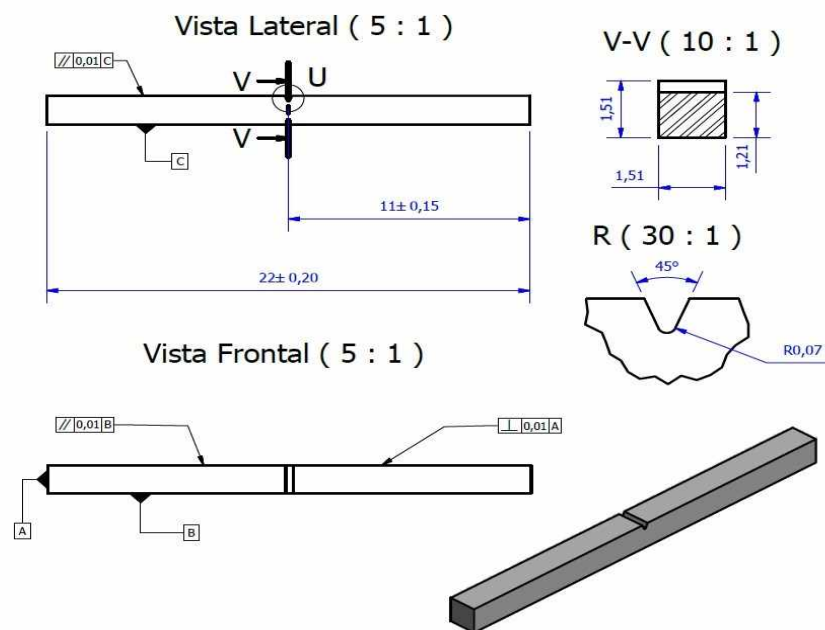


Figura 9 - Corpo de prova secção 1,51 mm x 1,51 mm, raio 0,07 mm.

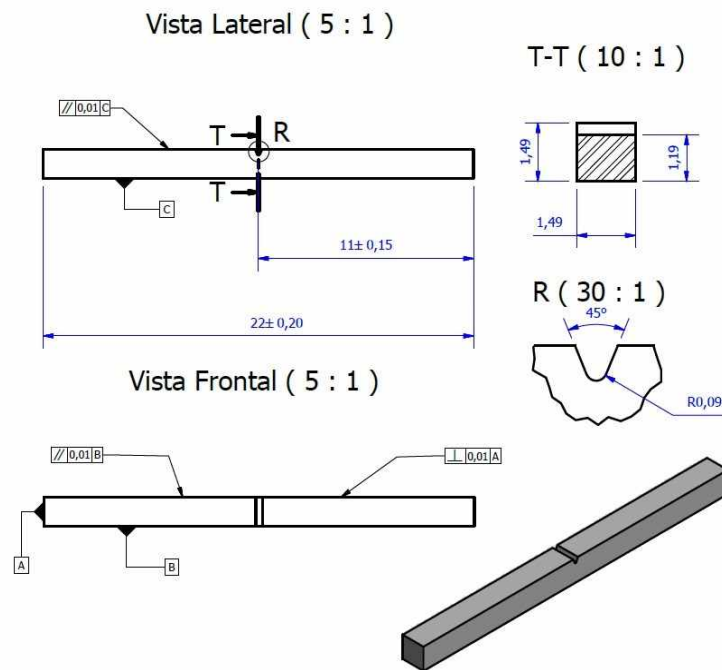


Figura 10 - Corpo de prova secção 1,49 mm x 1,49 mm, raio 0,09 mm.

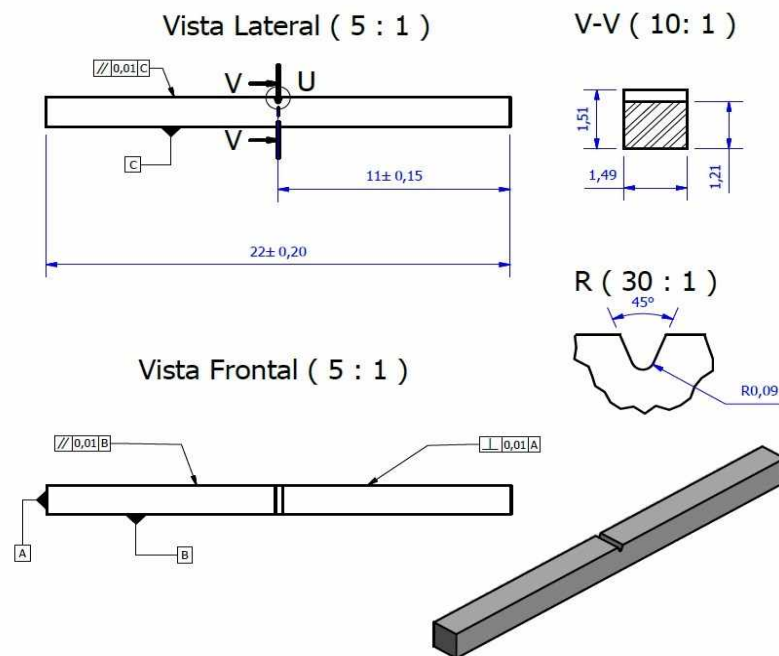


Figura 11 - Corpo de prova secção 1,51 mm x 1,49 mm, raio 0,09 mm.

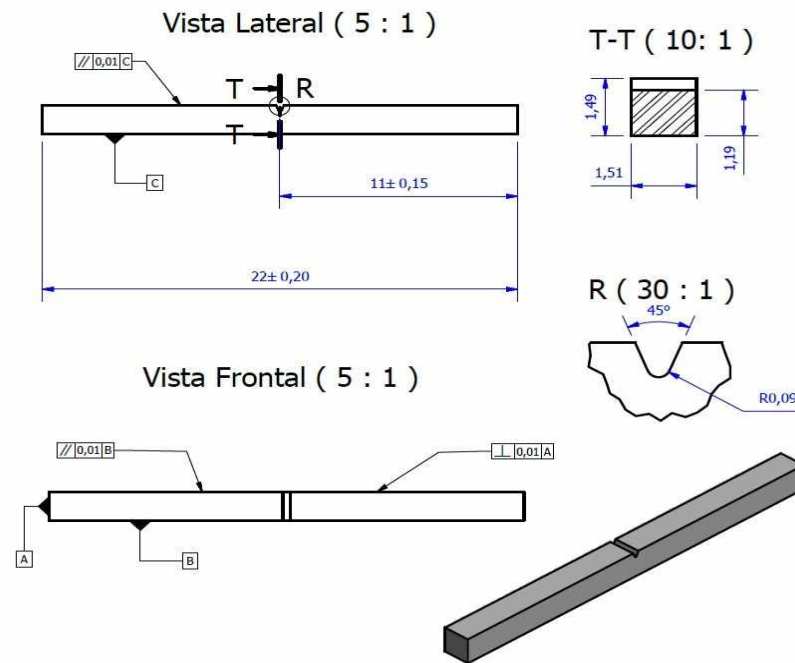


Figura 12 - Corpo de prova secção 1,49 mm x 1,51 mm, raio 0,09 mm.

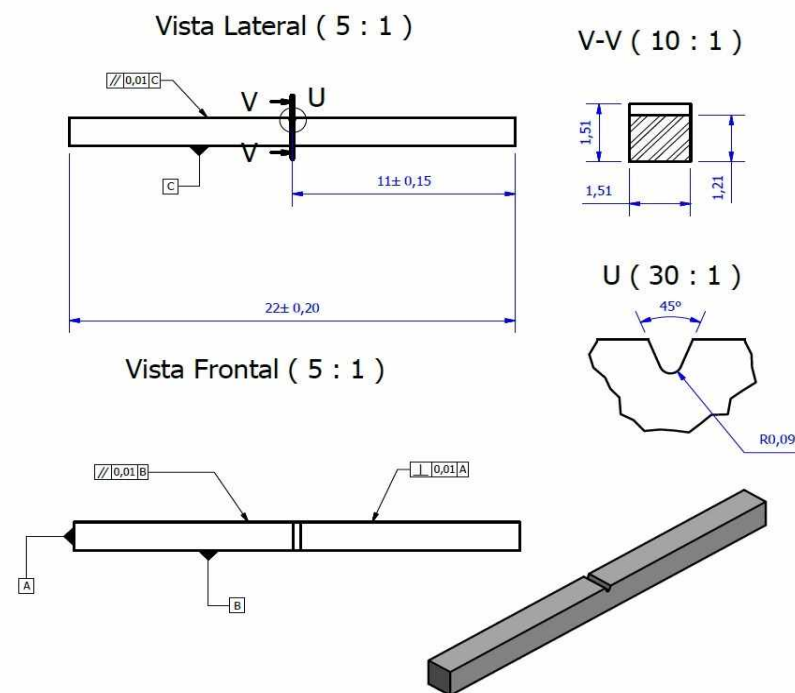










































Figura 13 - Corpo de prova secção 1,51 mm x 51 mm, raio 0,09 mm.

Esses corpos de prova foram medidas com micrômetro digital com precisão de 0,001 mm, a fim de confirmar a saída da máquina. Dos 200 corpos de prova fabricados foram

selecionados 40 que estivessem nos limites da tolerância dimensional. Isso foi feito pois os mesmos corpos de prova foram usadas para outro trabalho a fim de testar a influência da variação dimensional dentro da tolerância. Para esse trabalho critério de fabricação/seleção pode ser desconsiderado, visto que o objetivo foi avaliar a influência da camada refundida em corpos de prova dentro da tolerância dimensional, e esses corpos de prova apesar de estarem nos limites da tolerância, estão dentro da tolerância.

Para a análise da influência da espessura da camada refundida nos valores de energia absorvida no ensaio mini Charpy, foram selecionados os 40 corpos de prova da Tabela 1, sendo 5 corpos de prova de cada grupo dimensional Figuras 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e que obedecem a tolerância dimensional de 0,01 mm nas secções e no raio.

Tabela 1 - Amostras escolhidas para o ensaio de impacto mini Charpy.

Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
							
3	11	1	8	3	19	4	17
							
7	14	25	6	21	28	14	8
							
10	22	4	1	11	21	7	18
							
15	26	10	32	20	30	21	9
							
12	19	5	30	4	27	9	14

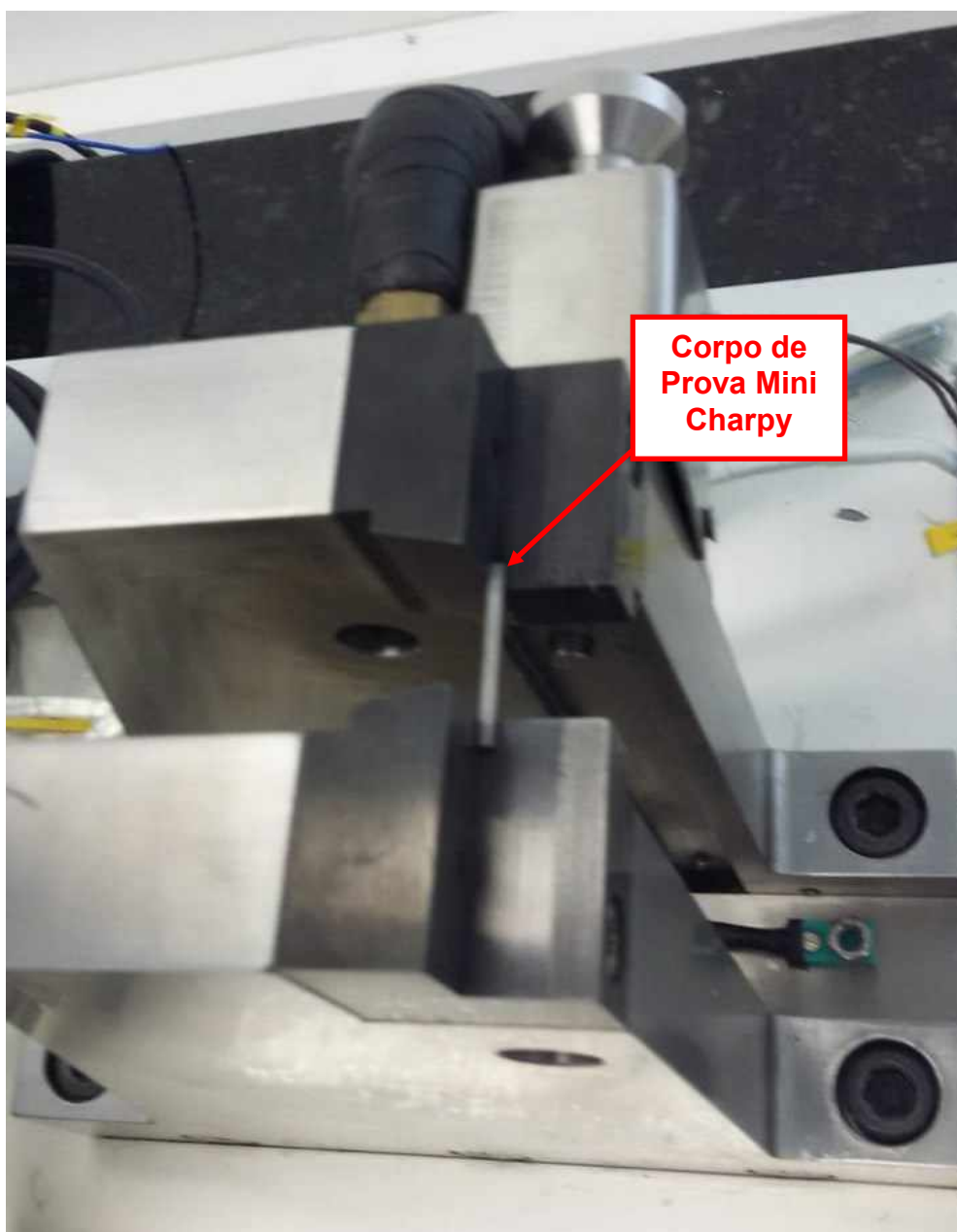


Figura 15 - Corpo de prova posicionado para ensaio no sistema mini Charpy LTAD-UFU.















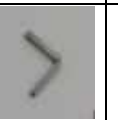

























Esses 40 corpos de prova foram posicionados como na Figura 15 e ensaiados no mini Charpy, em sala com temperatura controlada com termômetro digital ambiente em 20°C. Após ensaiados os corpos de prova ficaram no formato mostrado na Tabela 2, mostrando que apesar de rompidos, nenhum corpo de prova chegou a se separar em duas partes.

Para cada corpo de prova chegou-se em 2 valores de energia absorvida, a energia absorvida EACR, que é um valor de energia em Joules que obedece uma equação

desenvolvida por um dos desenvolvedores da máquina, e a energia absorvida EAMT que representa a equação tradicional utilizada nos ensaios Charpy. O resultado de energia utilizado para o seguimento desse trabalho foi o tradicional.

Levando-se em conta que a preparação do corpo de prova para análise da espessura da camada refundida resulta em alterações muito relevantes da secção do corpo de prova, todos os processos de preparação foram realizados posteriores ao ensaio de impacto mini Charpy.

Tabela 2 - Corpos de prova após ensaios.

Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
							
3	11	1	8	3	19	4	17
							
7	14	25	6	21	28	14	8
							
10	22	4	1	11	21	7	18
							
15	26	10	32	20	30	21	9
							
12	19	5	30	4	27	9	14

Dentro de cada grupo dimensional foram selecionados 3 corpos de prova. O critério de seleção dos 3 corpos de prova, foi o retorno do ensaio mini Charpy. Foram selecionados os corpos de prova que tinham o maior valor de energia absorvida, o menor valor de energia absorvida e um valor intermediário de energia absorvida em cada grupo de corpos de prova.

Todos esses corpos de prova para que pudessem ser lixados e polidos foram embutidos em baquelite. A fim de economizar tempo e material de embutimento, foram embutidas as 3 corpos de prova de cada grupo em um mesmo embutimento. No

embutimento foram colocadas esferas nos extremos dos cilindros de embutimento (Figura 17) a fim de apoiar o lixamento e não deixar que houvessem angulação no plano dos corpos de prova.



Figura 17 - Corpos de prova embutidas em baquelite, preparadas e atacadas.

Com todos os corpos de prova embutidos, cada cilindro de embutimento foi lixado em lixa 200, posteriormente em lixa 600 e finalmente em lixa 1000, obedecendo um mesmo sentido de lixamento na lixadora circular. Posteriormente todos os corpos de prova foram polidos em pasta de diamante e atacadas.

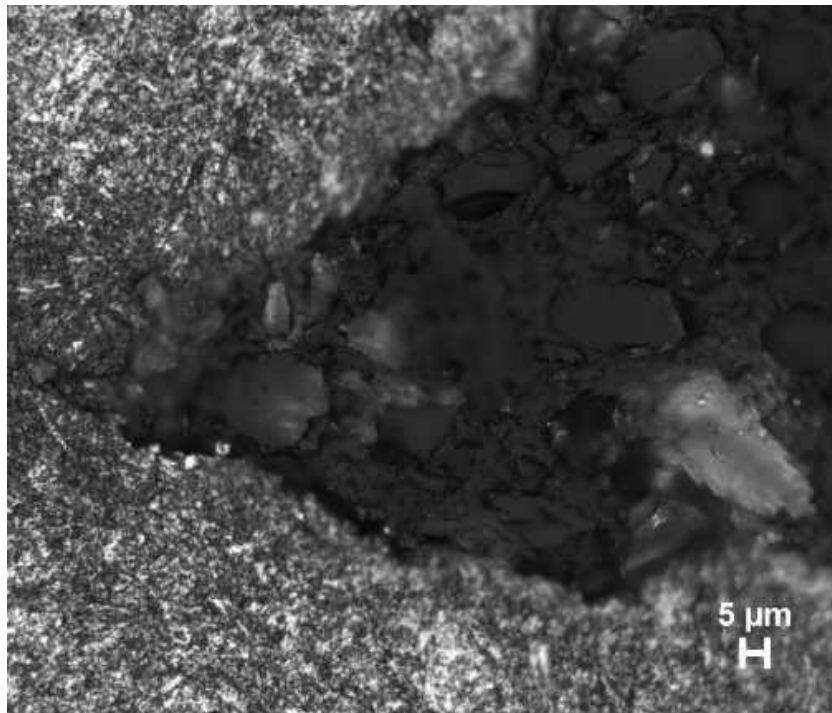


Figura 18 - Fotomicrografia da região do entalhe.

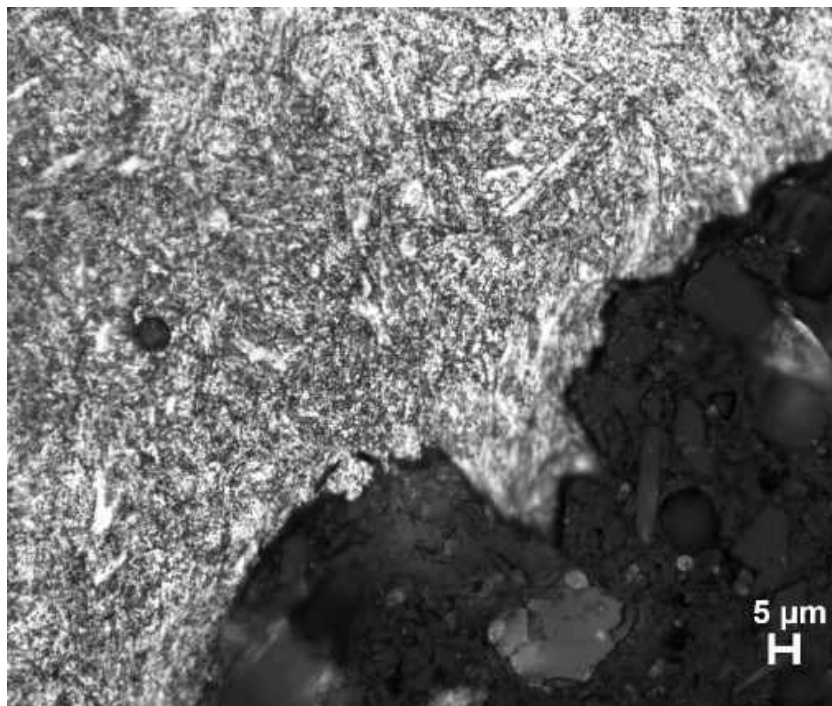


Figura 19 - Fotomicrografia da quina do entalhe.

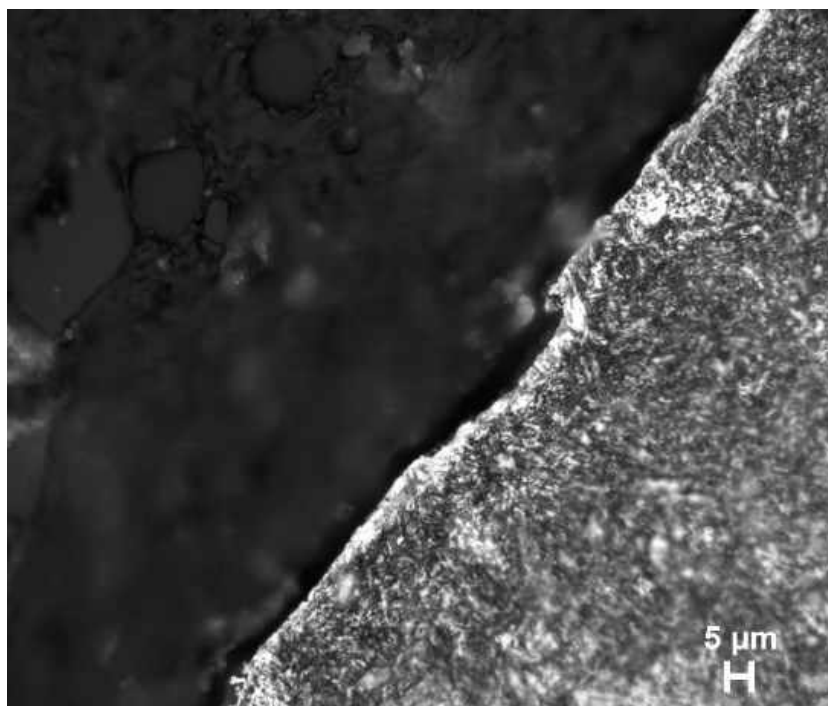


Figura 20 - Fotomicrografia da região mais próxima ao entalhe que se observou existência de camada refundida.

No microscópio foram captadas três fotomicrografias de cada corpo de prova ensaiado. Uma fotomicrografia da região do entalhe, uma fotomicrografia da quina do entalhe e uma fotomicrografia da região mais próxima ao entalhe que se observou existência de camada refundida.

No entalhe, Figura 18, em nenhum dos ensaios foi possível identificar sinais de camada refundida, acredita-se que devido à sua alta fragilidade a camada refundida se solta durante o ensaio, visto que, a análise deve ser feita com corpos de prova ensaiados.

Nas regiões bem próximas ao entalhe, Figura 19, também em nenhum dos experimentos foi possível encontrar camada refundida. Essa região se encontra exatamente ao fim do entalhe, uma quina, acredita-se também, que a camada refundida desse local, foi arrancada durante o ensaio dos corpos de prova.

Nas regiões após a quina que fica ao fim do entalhe, Figura 20, é possível identificar camada refundida. Todas as imagens dessas regiões foram captadas levando em conta a maior proximidade do entalhe (região crítica) e a existência de camada refundida. Portanto, todas as imagens dessa região, que não é exatamente a mesma em todos os corpos de prova, possuem camada refundida.

Como o entalhe teve a mesma quantidade de passes do fio durante a eletroerosão que o restante da face onde se encontra o entalhe, a face toda deve ter a mesma espessura de camada refundida, e portanto, esse cuidado com a região de medição da espessura da camada refundida poderia ser desprezado. Apesar disso o projeto busca aproximar-se o máximo da região do entalhe que é onde acontece o rompimento do material, então para evitar dúvidas a respeito da maior interferência da camada refundida nessa região, ela foi a utilizada para estudo.

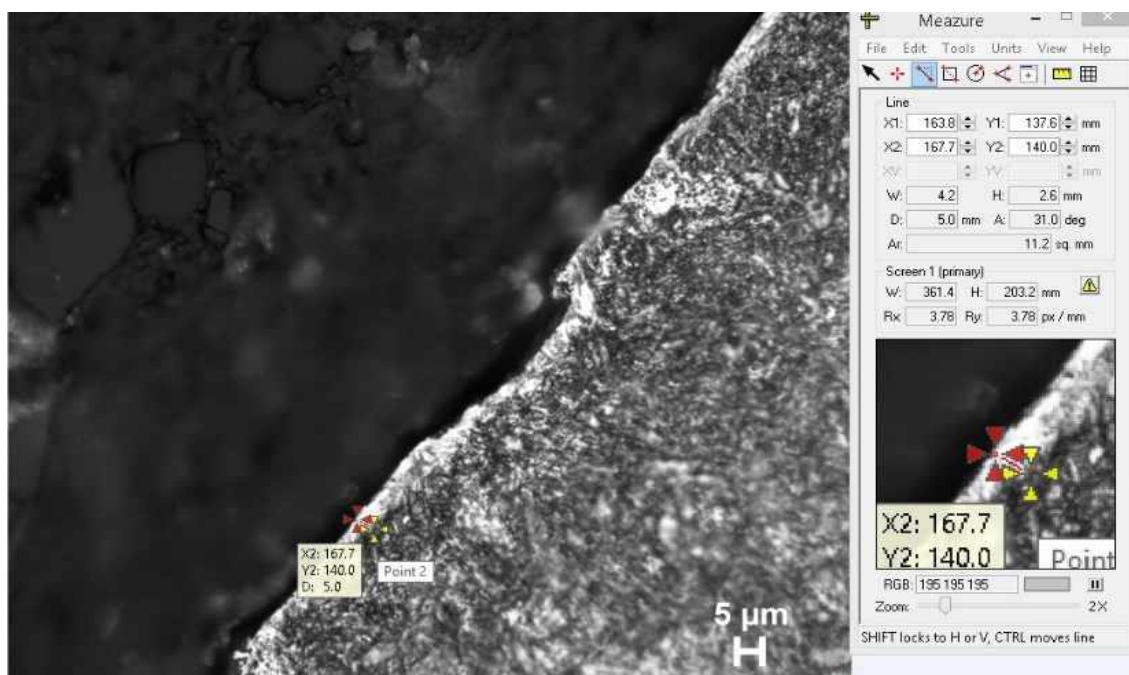


Figura 21 (a) - Imagem microscópica no software de medição Meazure.

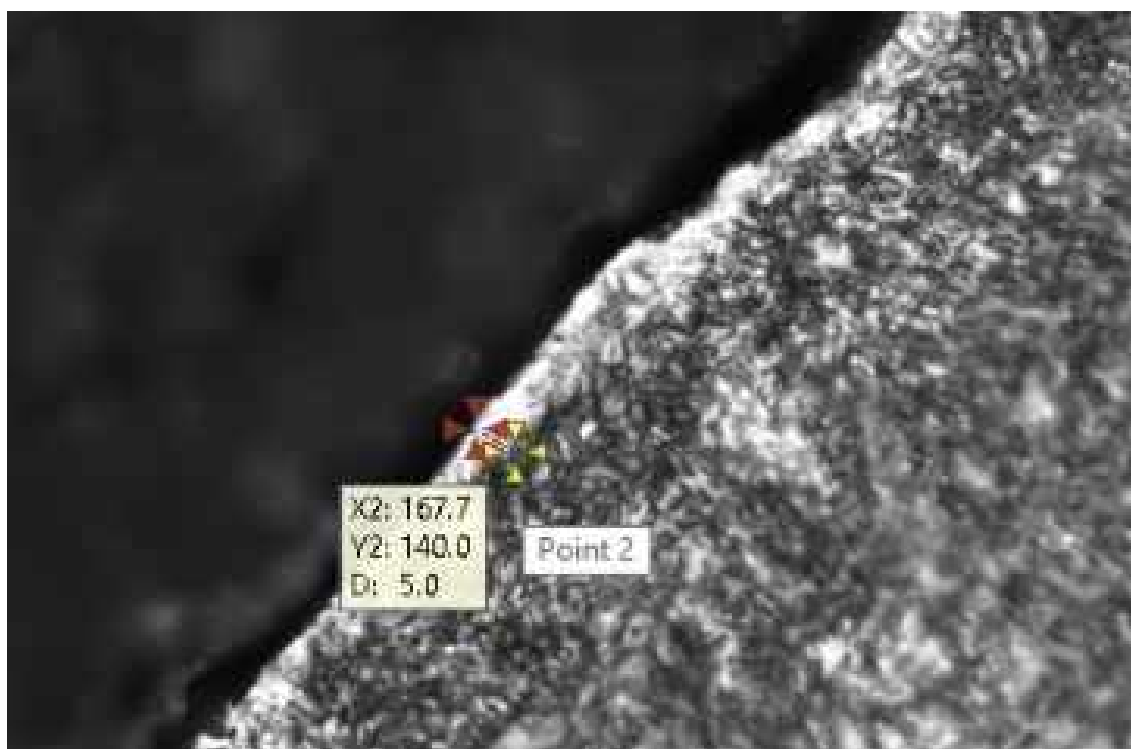


Figura 21 (b) - Aproximação da região de medição.

Nas fotomicrografias onde se identificou camada refundida (Figuras 21(a) e 21(b)), foram realizadas através do software Meazure 5 medidas da camada refundida em pontos diferentes e aleatórios da imagem. A partir dos resultados dessas medições chegou-se a uma espessura média da camada refundida em cada corpo de prova.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após todos os processos mencionados anteriormente, chegou-se a valores de energia absorvida e nos valores médios de espessura da camada refundida. Estes resultados são apresentados nas Tabelas 3 a 11.

Tabela 3 - Resultados ensaio Charpy corpos de prova 1,49x1,49, raio 0,07.

Corpos de prova	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
3	0,901174	0,787669
7	0,894122	0,78593
10	0,872269	0,764877
15	0,887602	0,781352
12	0,948837	0,845084
Média	0,900801	0,792982
Desvio	0,028898	0,030487

Tabela 4 - Resultados ensaio Charpy corpos de prova 1,51x1,49, raio 0,07.

Corpos de prova	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
11	0,877147	0,771807
14	0,925171	0,821328
22	0,925504	0,821575
26	0,904698	0,800529
10	0,902277	0,798824
Média	0,906959	0,802813
Desvio	0,019946	0,020477

Tabela 5 - Resultados ensaio Charpy corpos de prova 1,49x1,51, raio 0,07.

Corpos de prova	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
1	0,919074	0,816975
25	0,916273	0,814026
4	0,924657	0,823284
10	0,921773	0,820552
5	0,905147	0,801939
Média	0,917385	0,815355
Desvio	0,007517	0,008280

Tabela 6 - Resultados ensaio Charpy corpos de prova 1,51x1,51, raio 0,07.

Corpos de prova	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
8	0,901528	0,800069
6	0,901539	0,801868
1	0,916445	0,816151
32	0,909293	0,809267
30	0,949072	0,850018
Média	0,915575	0,815475
Desvio	0,019727	0,020339

Tabela 7 - Resultados ensaio Charpy corpos de prova 1,49x1,49, raio 0,09.

Corpos de prova	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
3	0,882833	0,782558
21	0,901789	0,802317
11	0,904789	0,804864
20	0,878304	0,777762
4	0,933928	0,835911
Média	0,900329	0,800682
Desvio	0,022035	0,022995

Tabela 8 - Resultados ensaio Charpy corpos de prova 1,51x1,49, raio 0,09.

Corpos de prova	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
19	0,925132	0,829366
28	0,919822	0,823658
21	0,903564	0,806737
30	0,887859	0,790872
27	0,914244	0,817355
Média	0,910124	0,813598
Desvio	0,014790	0,015227

Tabela 9 - Resultados ensaio Charpy corpos de prova 1,49x1,51, raio 0,09.

Corpos de prova	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
4	0,901076	0,803563
14	0,898347	0,801198
7	0,883882	0,787283
21	0,882757	0,785343
9	0,875617	0,783935
Média	0,888336	0,792264
Desvio	0,010900	0,009348

Tabela 10 - Resultados ensaio Charpy corpos de prova 1,51x1,51, raio 0,09.

Corpos de prova	Energia AMT [J]	Energia AMCR [J]
17	0,90795	0,812711
8	0,971251	0,877612
18	0,916643	0,824131
9	0,919612	0,825777
14	0,941025	0,846872
Média	0,931296	0,837421
Desvio	0,025433	0,025629

Dos resultados acima, foram selecionadas 3 corpos de prova de cada grupo de corpos de prova, selecionando a corpos de prova com maior valor de energia absorvida, a corpos de prova com o menor valor de energia absorvida e o valor intermediário de energia absorvida. Resultando em 24 corpos de prova que para esse trabalho são corpos de prova que obedecem a tolerância de 0,01 mm, não importando para o trabalho a qual grupo de tolerância a corpos de prova pertence. Novamente frisando que não foi o objetivo desse trabalho analisar a influência do dimensional, somente a influência da camada refundida.

Tabela 11 - Energia Absorvida no Ensaio Mini Charpy.

Corpos de prova	Energia absorvida [J]
1	0,95
2	0,89
3	0,87
4	0,93
5	0,90
6	0,88
7	0,92
8	0,92
9	0,91
10	0,95
11	0,91
12	0,90
13	0,93
14	0,90
15	0,88
16	0,93
17	0,91
18	0,89
19	0,90
20	0,88
21	0,88
22	0,97
23	0,92
24	0,91

A Tabela 11 retorna a problemática do projeto. Os valores de energia absorvida no ensaio, por mais que venham de corpos de prova produzidos de forma controlada com tolerância dimensional de 10 μm , sofrem variações. E essas variações são inferiores a 3%.

A Figura 22 mostra como variam os valores de energia, e deixa bem explícita a variação de energia, que apesar de pequena obedece um padrão de variação. Esse padrão de variação é de acordo com a seleção dos corpos de prova. Para cada variação dimensional do conjunto de corpos de prova, foram selecionados 3 corpos de prova obedecendo um padrão que pegava o menor valor de energia, o maior valor de energia e um valor intermediário para cada grupo de corpos de prova. Como o trabalho visa analisar a influência da espessura da camada refundida de corpos de prova dentro da tolerância, essa variação dimensional não é importante para esse trabalho, visto que todos os grupos de corpos de prova tem variação dimensional controlada dentro da tolerância dimensional.

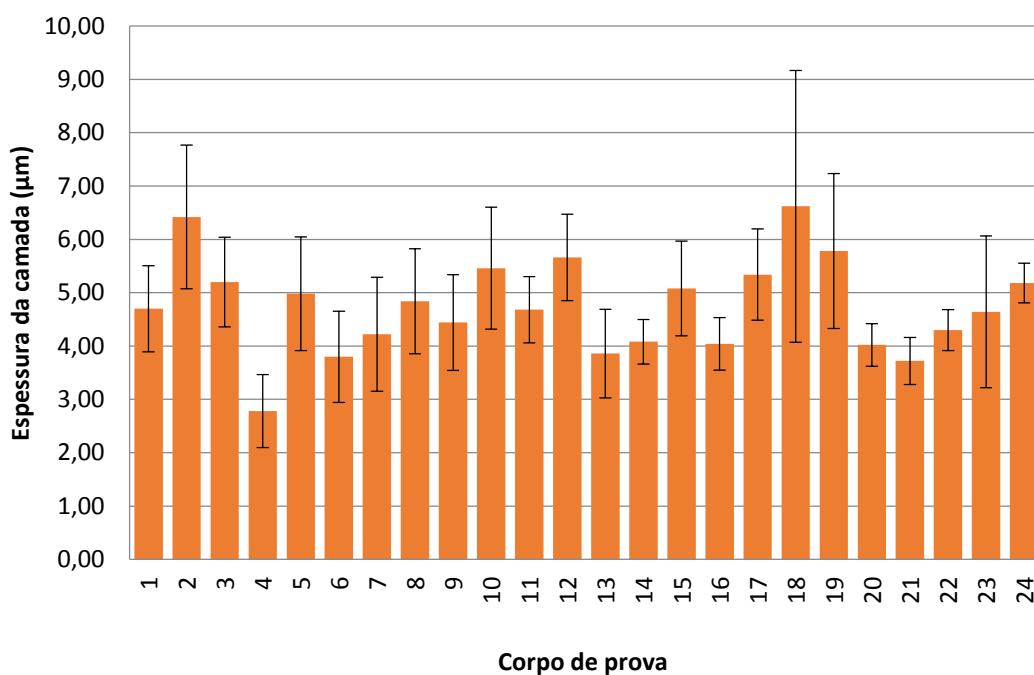


Figura 22 - Comparativo entre os valores de energia absorvida por cada corpo de prova.

Tabela 12 - Medidas de espessura da camada refundida de cada peça e média.

Corpo de prova	Medida 1 [mm]	Medida 2 [mm]	Medida 3 [mm]	Medida 4 [mm]	Medida 5 [mm]	Média [mm]	Desvio [mm]
1	6,20	4,70	4,50	3,80	4,30	4,70	0,90
2	5,40	7,00	6,60	4,60	8,50	6,42	1,50
3	4,30	4,90	6,20	4,40	6,20	5,20	0,94
4	2,10	2,50	3,60	3,60	2,10	2,78	0,77
5	4,60	5,00	3,40	6,70	5,20	4,98	1,19
6	3,40	2,80	5,30	3,40	4,10	3,80	0,96
7	2,80	3,10	4,80	5,50	4,90	4,22	1,19
8	6,40	4,00	5,60	4,20	4,00	4,84	1,10
9	5,10	3,40	3,40	5,60	4,70	4,44	1,00
10	6,50	4,50	6,20	6,40	3,70	5,46	1,28
11	5,50	4,20	4,50	3,90	5,30	4,68	0,69
12	6,30	6,70	5,70	5,20	4,40	5,66	0,91
13	3,00	3,00	4,50	5,10	3,70	3,86	0,93
14	4,00	3,60	3,70	4,40	4,70	4,08	0,47
15	4,30	4,10	6,60	5,30	5,10	5,08	0,99
16	4,30	3,80	4,60	4,30	3,20	4,04	0,55
17	6,70	4,10	5,60	4,90	5,40	5,34	0,96
18	9,90	7,50	8,40	3,40	3,90	6,62	2,85
19	4,00	4,20	6,10	7,00	7,60	5,78	1,63
20	4,30	3,70	4,60	3,50	4,00	4,02	0,44
21	3,30	4,50	3,30	3,70	3,80	3,72	0,49
22	4,70	4,80	4,10	4,10	3,80	4,30	0,43
23	3,20	4,20	3,30	6,90	5,60	4,64	1,59
24	5,50	5,70	4,70	5,10	4,90	5,18	0,41

Na Tabela 12 observa-se a espessura média da camada. Apesar de um desvio alto, é um parâmetro que representa de maneira aceitável a espessura da camada refundida. Todas as medidas foram realizadas de forma aleatório dentro de uma região pequena do corpo de prova, e o retorno das medições foi uma alta variação dimensional, mas essa variação dimensional persiste por todo o corpo de prova, ou seja, representar a camada refundida por essa média é preciso. A partir desses 2 parâmetros encontrados, energia absorvida [J] e espessura média da camada refundida [μm], o método utilizado para análise desses retornos foi uma análise gráfica.

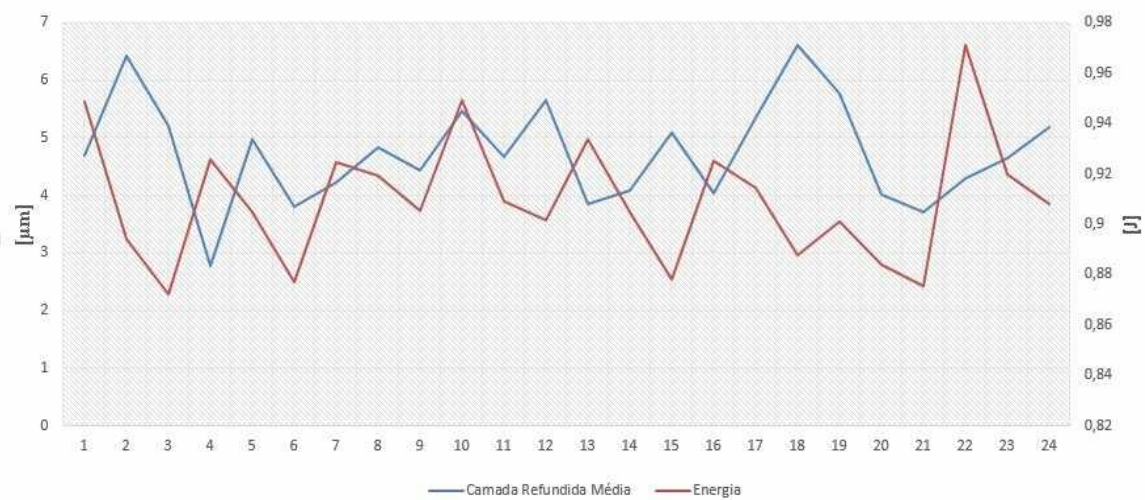


Figura 23 - Comparativo entre as curvas da Espessura Média da Camada Refundida e a Energia Absorvida.

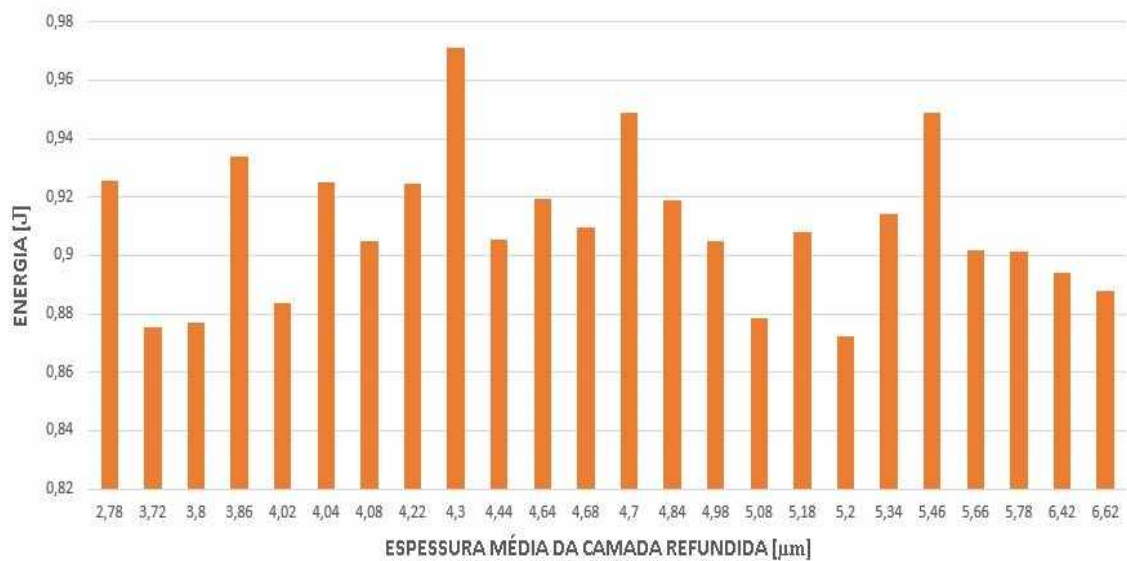


Figura 2 4 - Valores de Energia em função da Espessura da Camada Refundida em ordem crescente.

O gráfico da Figura 23 foi plotado de forma que a curva em vermelho representa os valores de energia absorvida no ensaio (eixo y) em função do número do corpo de prova (eixo x), e a curva em azul representa os valores da espessura média da camada refundida (eixo y) em função do número do corpo de prova (eixo x). Como o número do corpo de prova (eixo x) é coincidente nas duas curvas, para que houvesse alguma relação entre a energia absorvida e a espessura da camada refundida, seria esperado que as duas curvas tivessem comportamentos que se relacionassem, o que não acontece.

No gráfico da Figura 24 foram plotados os valores de energia absorvida (eixo y) em função da espessura média da camada refundida (eixo x), onde os valores da espessura da camada refundida foram ordenados de forma crescente. Para que houvesse alguma relação entre os valores de energia absorvida e espessura da camada refundida, o esperado seria que com o ordenamento de forma crescente da espessura da camada refundida, os valores de energia ou tivessem comportamento crescente ou comportamento decrescente, que não acontece.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na análise dos resultados deste trabalho, é possível afirmar que a espessura média da camada refundida em corpos de prova de dimensões 1,5mmx1,5mm e fabricados por eletroerosão a fio com parâmetros de usinagem que obedeceram o que o fabricante normatiza como as melhores condições possíveis da máquina de eletroerosão em material P110, não influencia nos valores de energia absorvida obtidos no ensaio mini Charpy.

Como todas as análises foram realizadas com o aço P110, fica como sugestão para uma pesquisa futura esse mesmo teste com diferentes materiais, e diferentes dimensões de corpos de prova, para sanar completamente todas as dúvidas a respeito da influência da espessura da camada refundida nos valores de energia absorvida pelos corpos de prova no ensaio mini Charpy.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARANTES, L.J.; SILVA, M. A.; SILVA, E. M.; RASLAN, A. A. **Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão**. Ouro preto, 2003
- ARANTES, L. J. **Desenvolvimento e avaliação do processo híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM)**. Uberlândia, 2007.
- ARANTES, L. J., “**Avaliação do Desempenho de Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Descargas Elétricas**”. Uberlândia, 2001.
- LIMA, E.F., **Rugosidade e Integridade Superficial do Aço Rápido ABNT M2 Após Usinagem por Descargas Elétricas**, Uberlândia, 1997
- GARCIA A.; SPIM J. A.; SANTOS C. A. **Ensaio dos Materiais**. V.2. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- MCGEOUCH J.A. – **Métodos Avançados de Usinagem**, 1988.
- COSTA M. V.; **Análise da Tenacidade de uma junta soldada de um aço resistente à abrasão da série 450 HB**, 2014.
- DUARTE A. S.; **Metodologia básica para a produção de materiais de referência para a calibração indireta de máquinas pendulares de impacto Charpy**, 2006
- LUCAS, G. E. **The Development of Small Specimen Mechanical Test Techniques**. *Journal of Nuclear Materials*, 117, p. 327-339, 1983.
- CALLISTER JUNIOR; WILLIAN D. – **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. LTC, 2002
- SABO S. C., SCHMIDT I. - **Processos de Eletroerosão**, Porto Alegre, 2008.
- KOBAYASHI T., KIM H. J., MORITA S. - **Pogress and Development in the Instrumented Charpy Impact Test.**, 2001
- MELO G. V. C. - **Análise Dimensional de Geométrica de Corpos de Prova para Ensaio de Impacto Mini Charpy**, 2017.
- FRANCO, S. D. - **Avaliação Não-Destrutiva de propriedades mecânicas através de microtestes mecânicos**, 2018.
- ARANTES L. J., LIMA L. S. G., RODRIGUES G. B., SILVA J. A., ARENCIBIA R. V., CRUZ-CRESPO A. - **Avaliação da influência da camada refundida na energia absorvida durante ensaio de impacto mini Charpy**, 2019.

APÊNDICE A

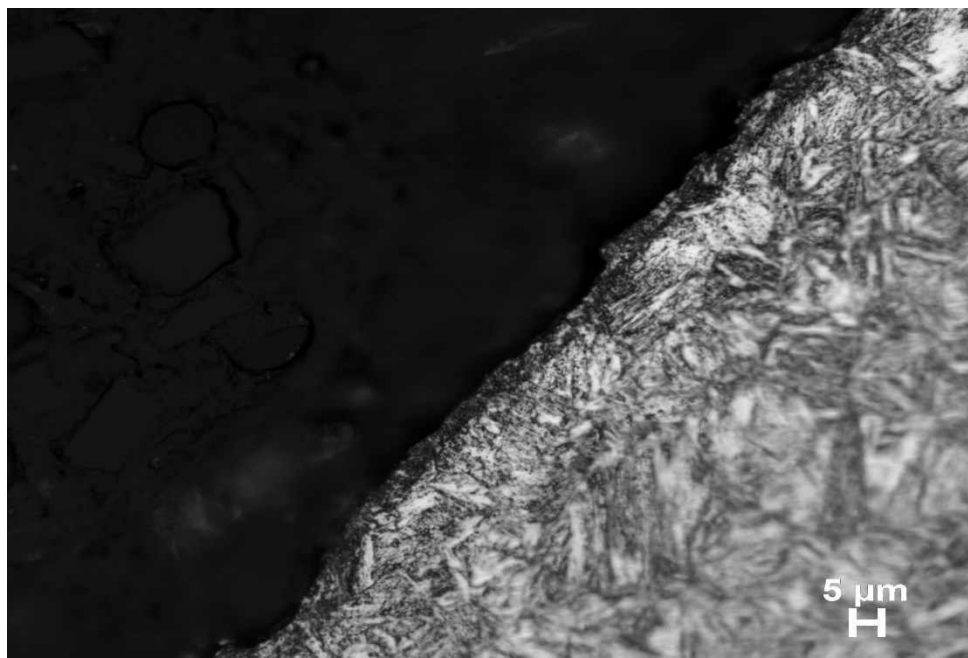


Figura A.1 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 1.

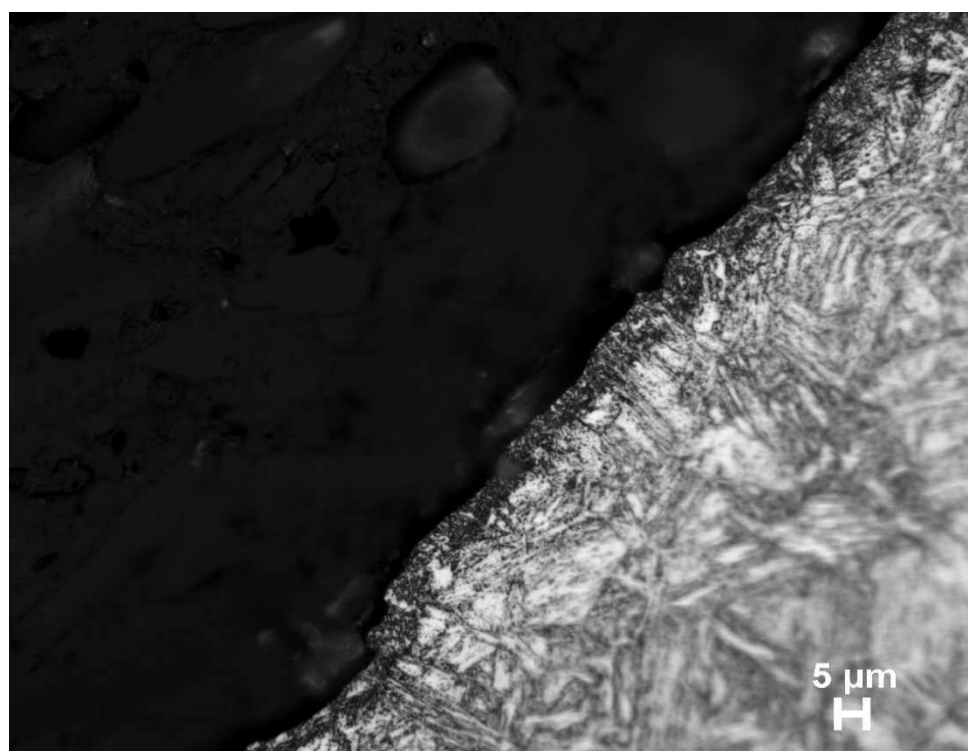


Figura A.2 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 2.

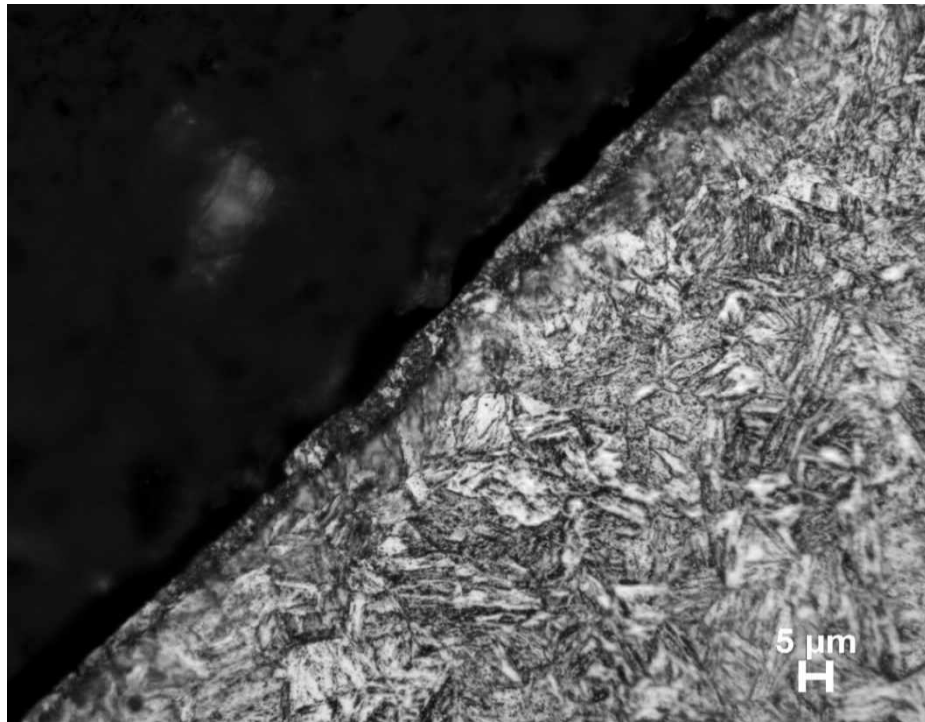


Figura A.3 -Fotomicrografia da camada refundida da Corpo de prova 3.

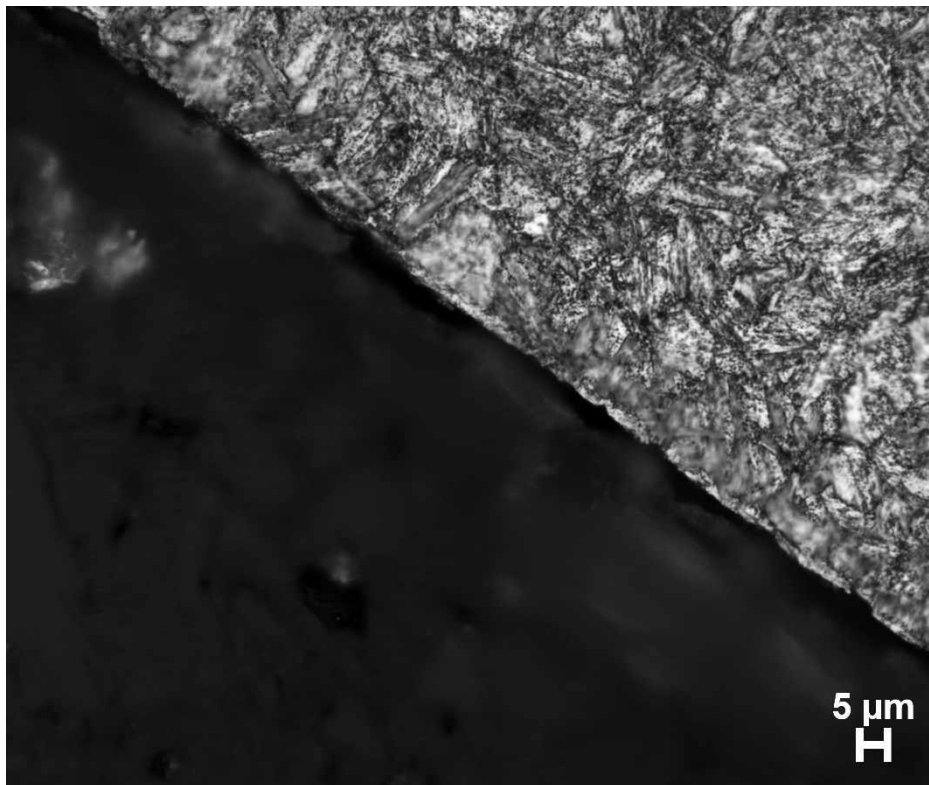


Figura A.4 - Fotomicrografia da camada refundida da Corpo de prova 4.

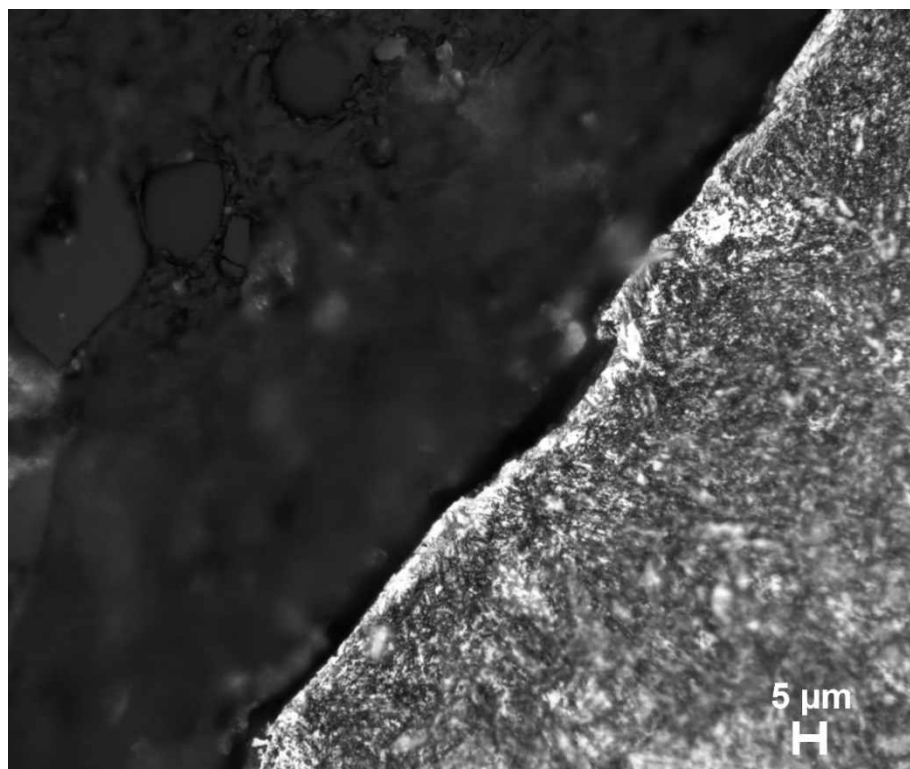


Figura A.5 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 5.

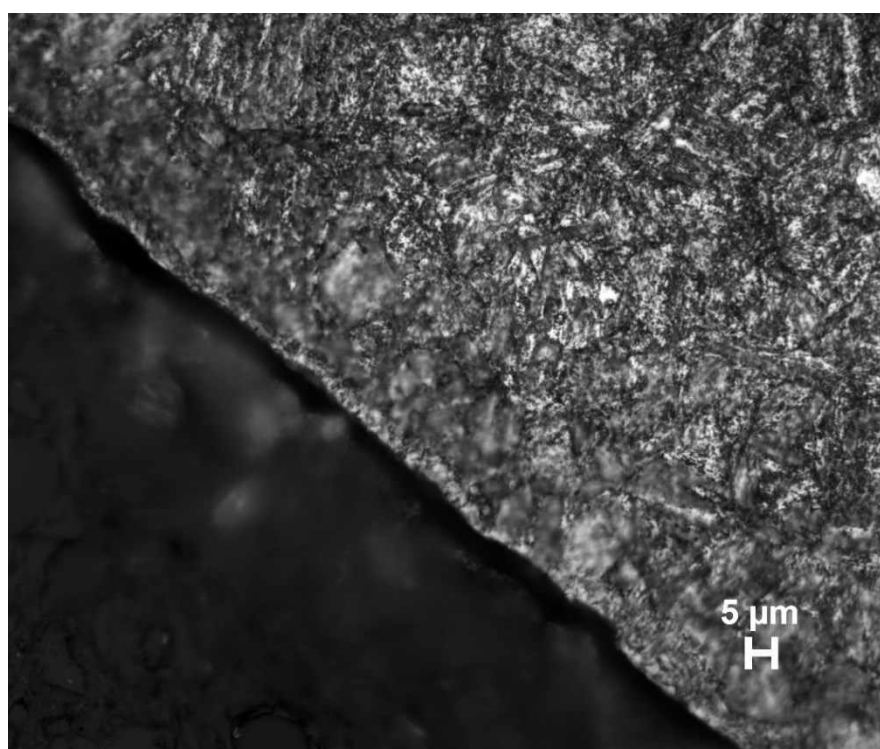


Figura A.6 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 6.

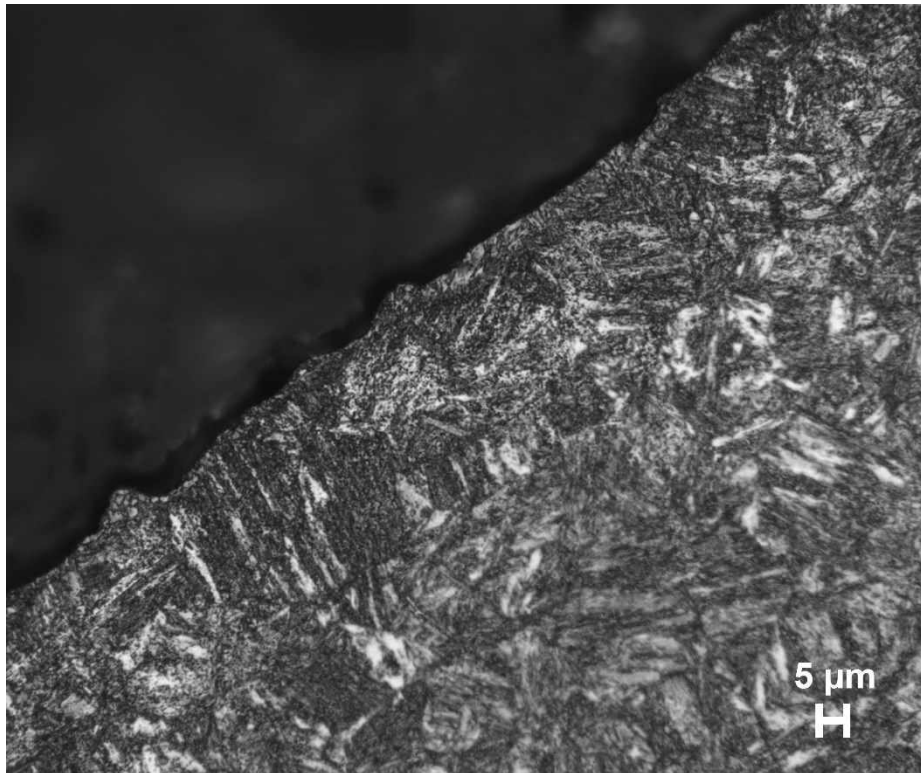


Figura A.7 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 7.

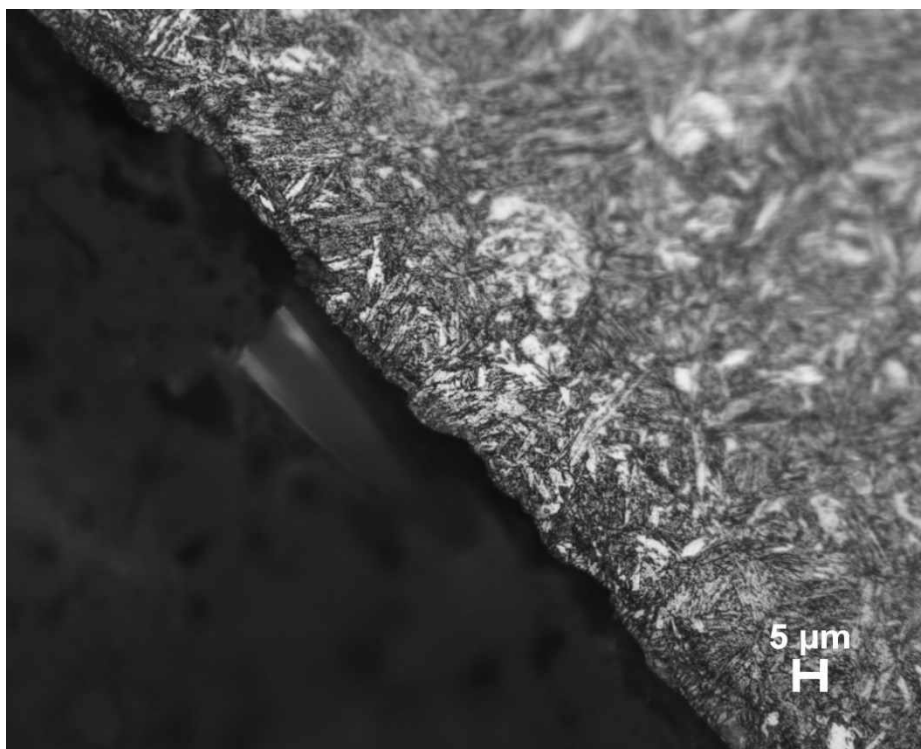


Figura A.8 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 8.

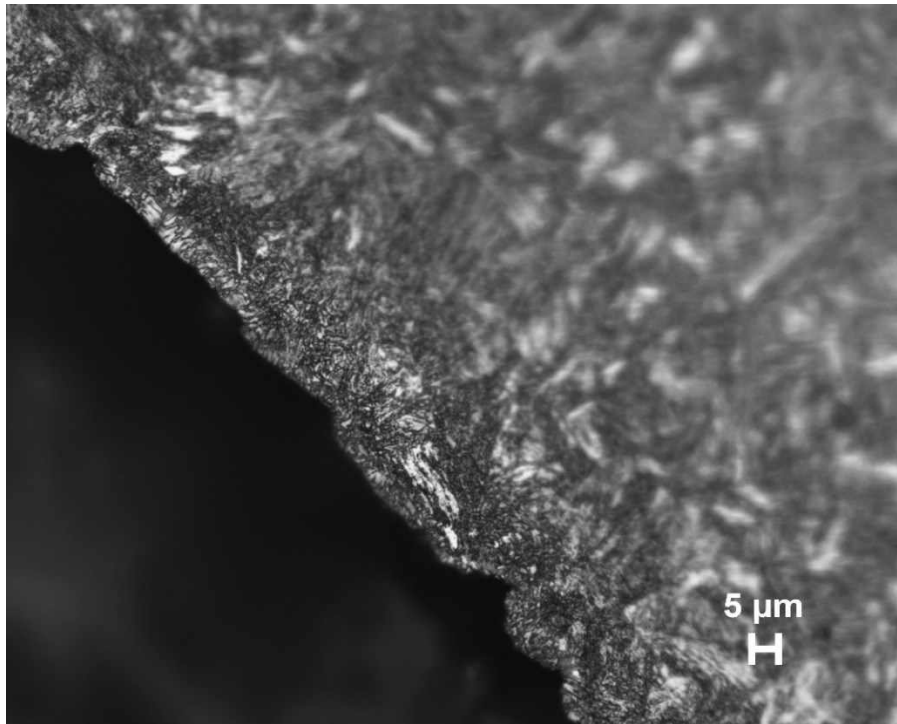


Figura A.9 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 9.

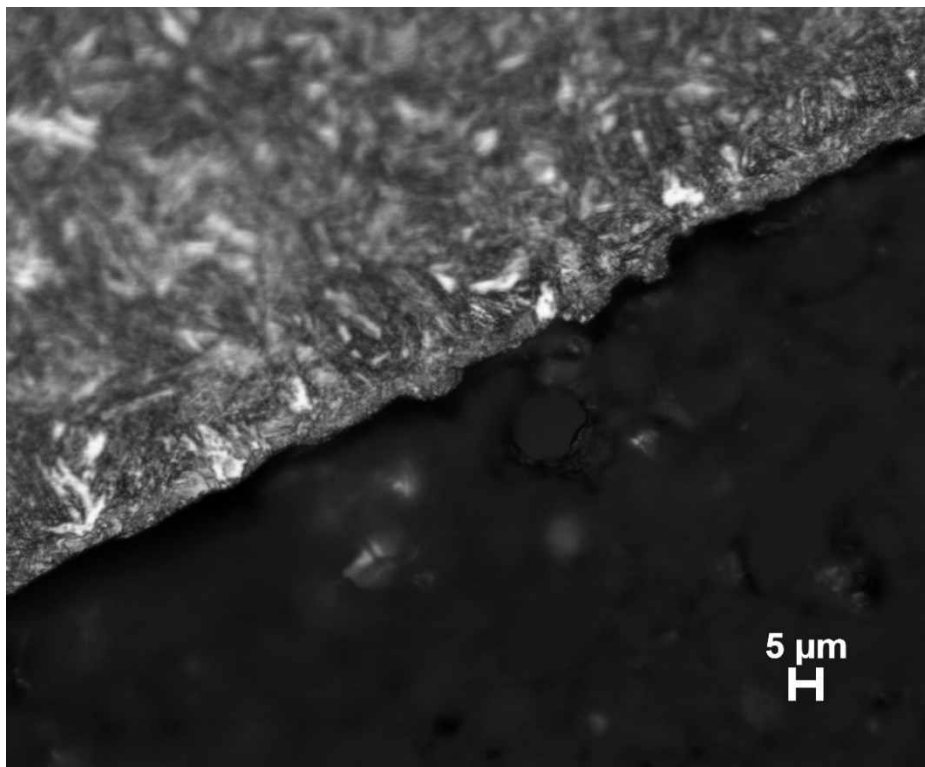


Figura A.10 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 10.

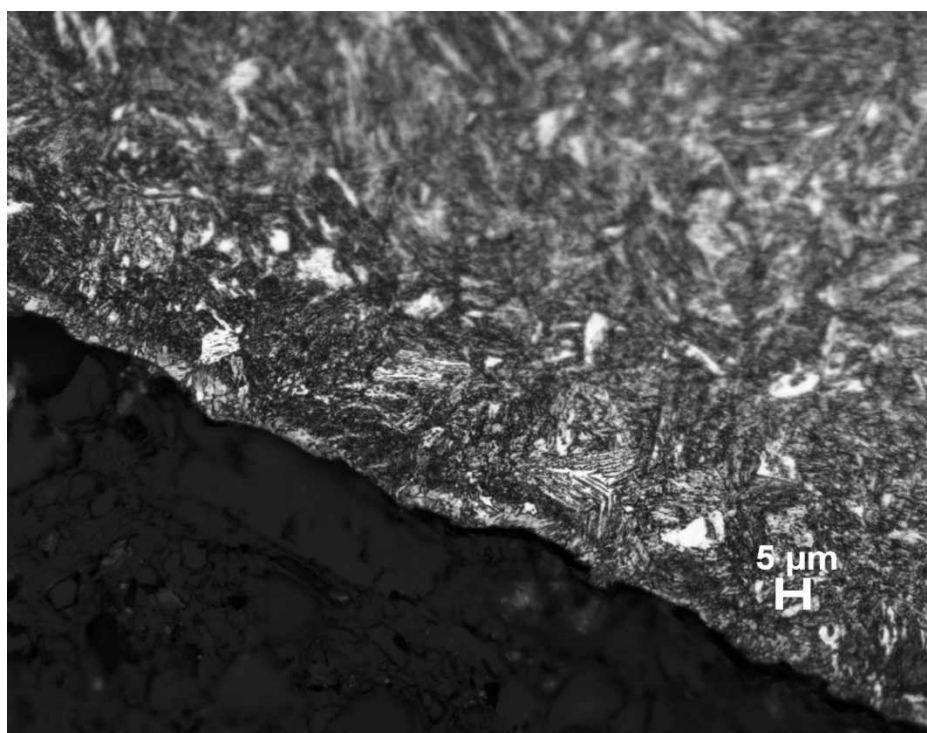


Figura A.11 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 11.

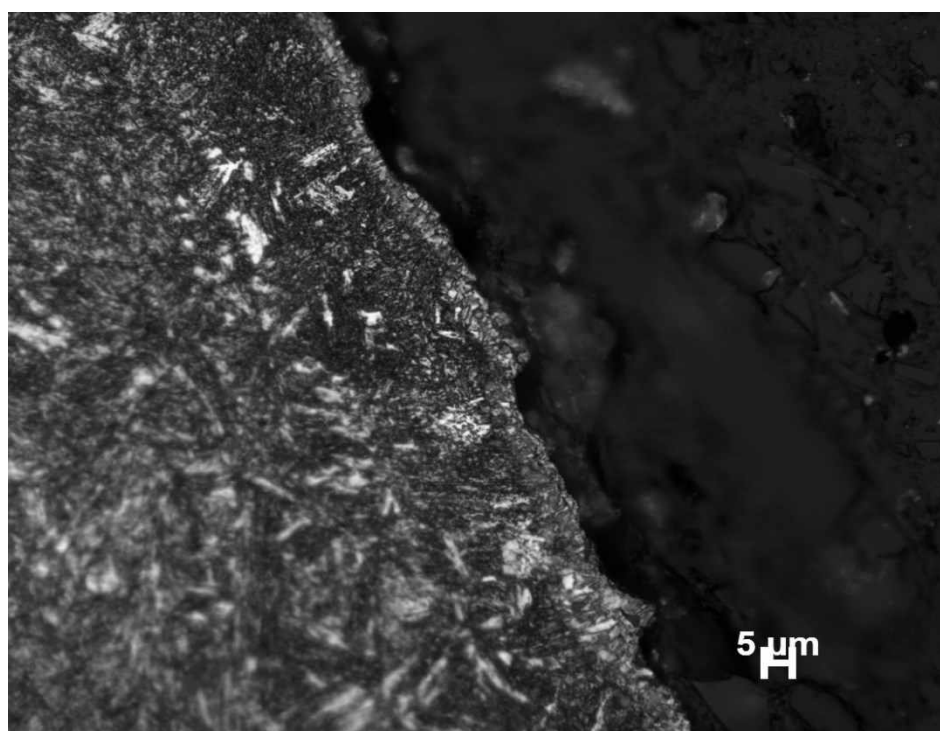


Figura A.12 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 12.

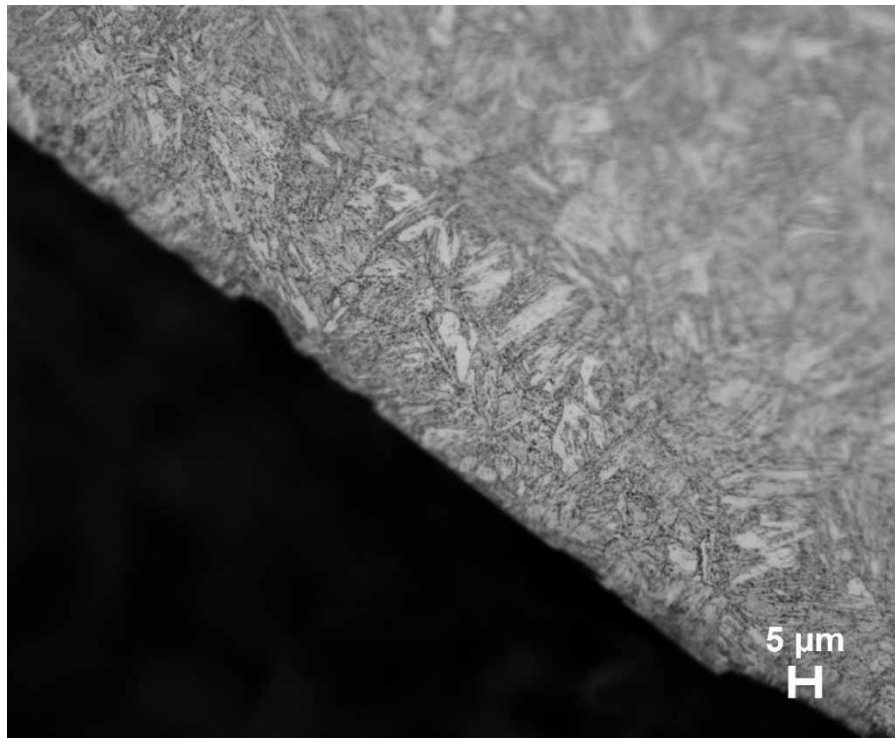


Figura A.13 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 13.

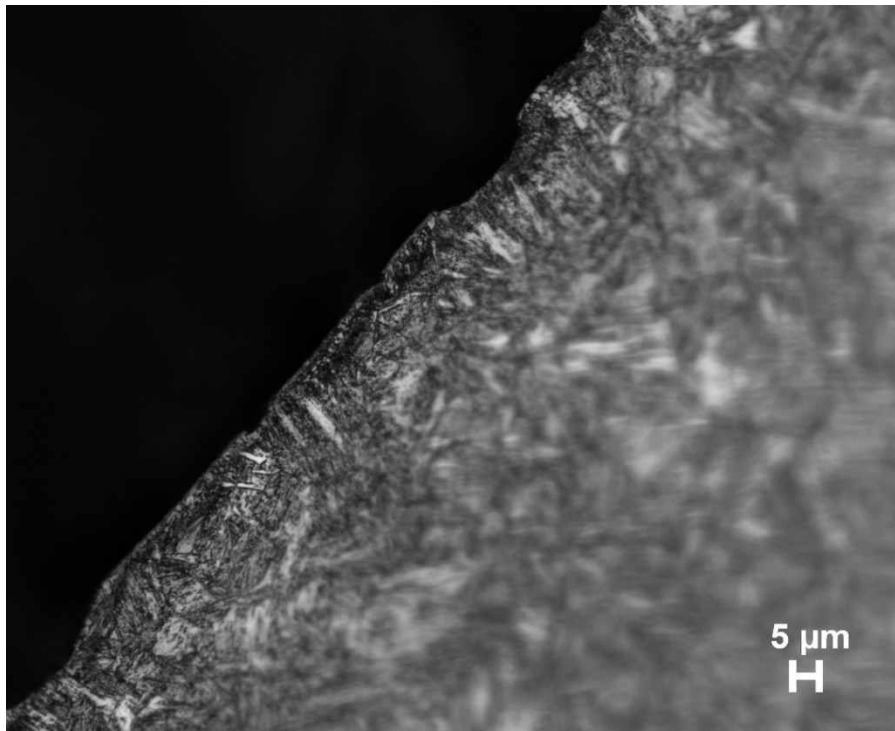


Figura A.14 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 14.

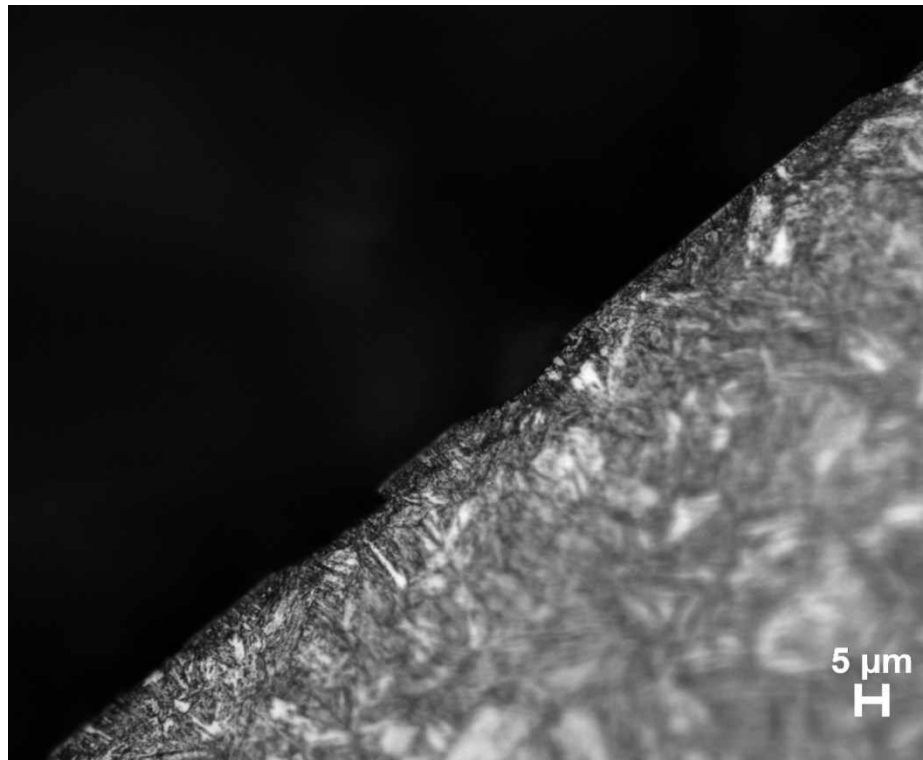


Figura A.15 -Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 15.

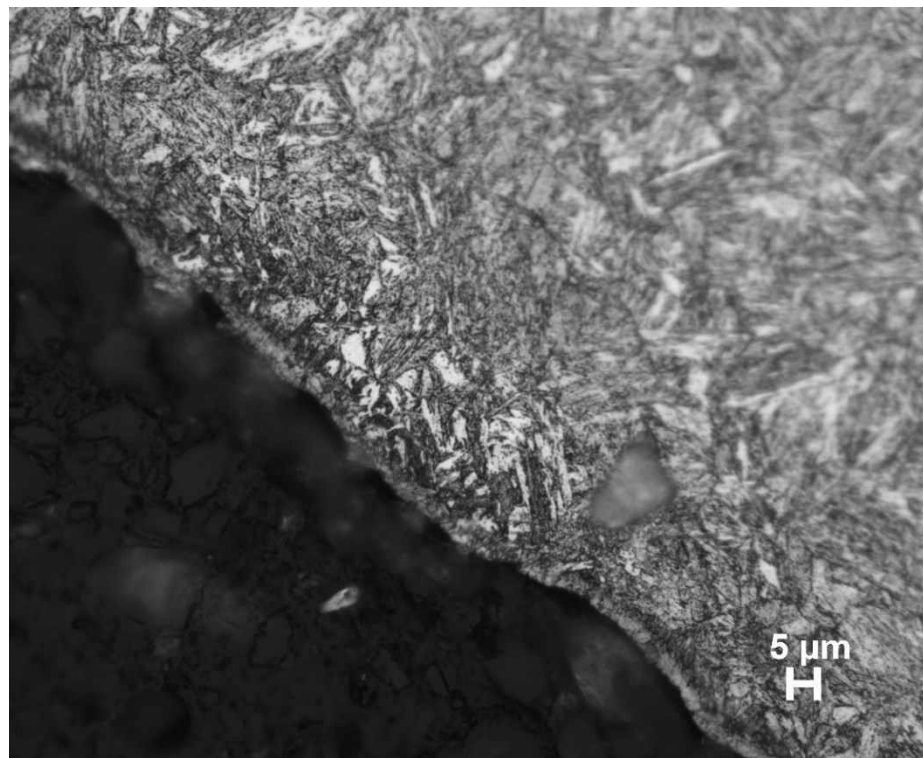


Figura A.16 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 16.

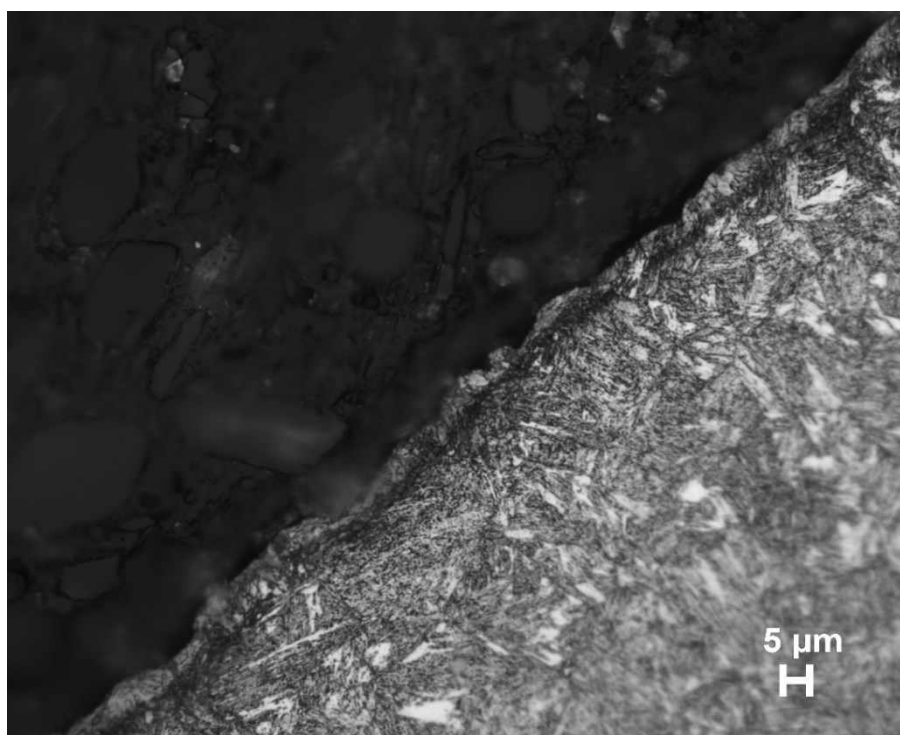


Figura A.17: -Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 17.

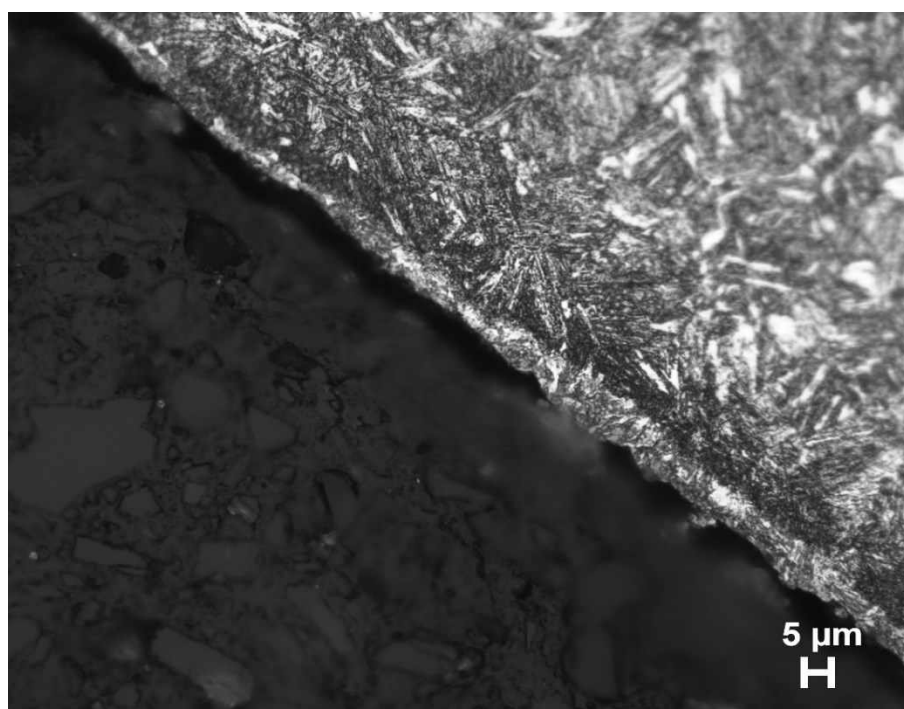


Figura A.18 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 18.

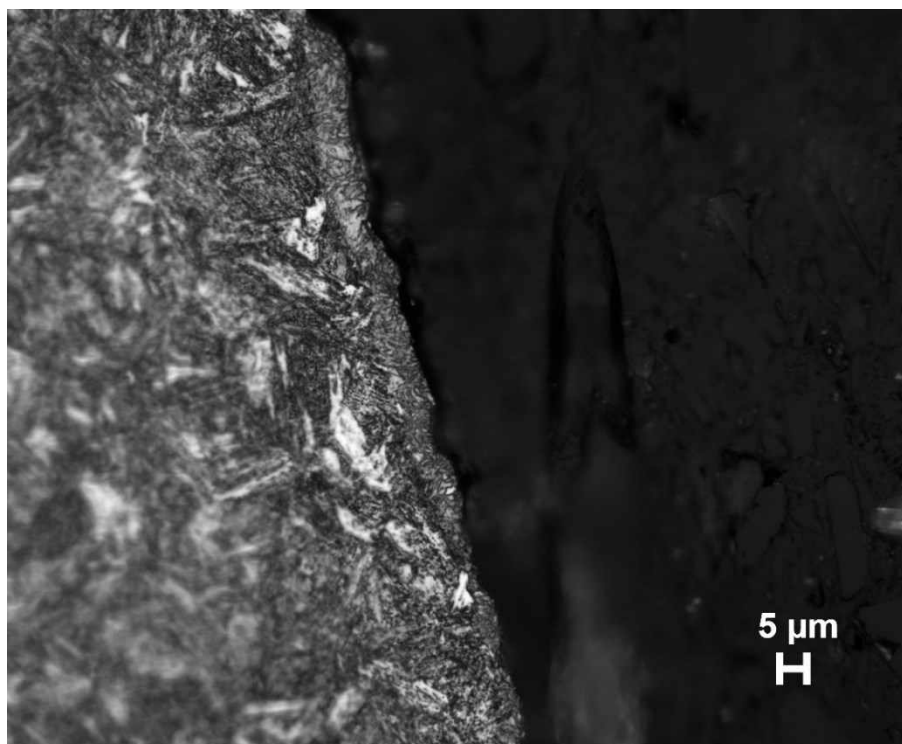


Figura A.19 -Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 19.

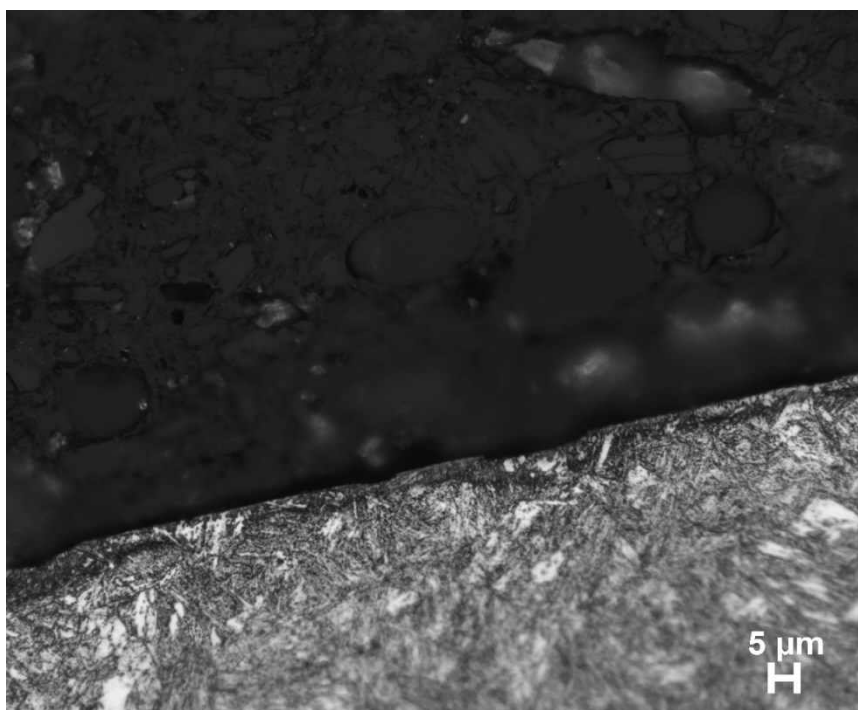


Figura A.20 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 20.

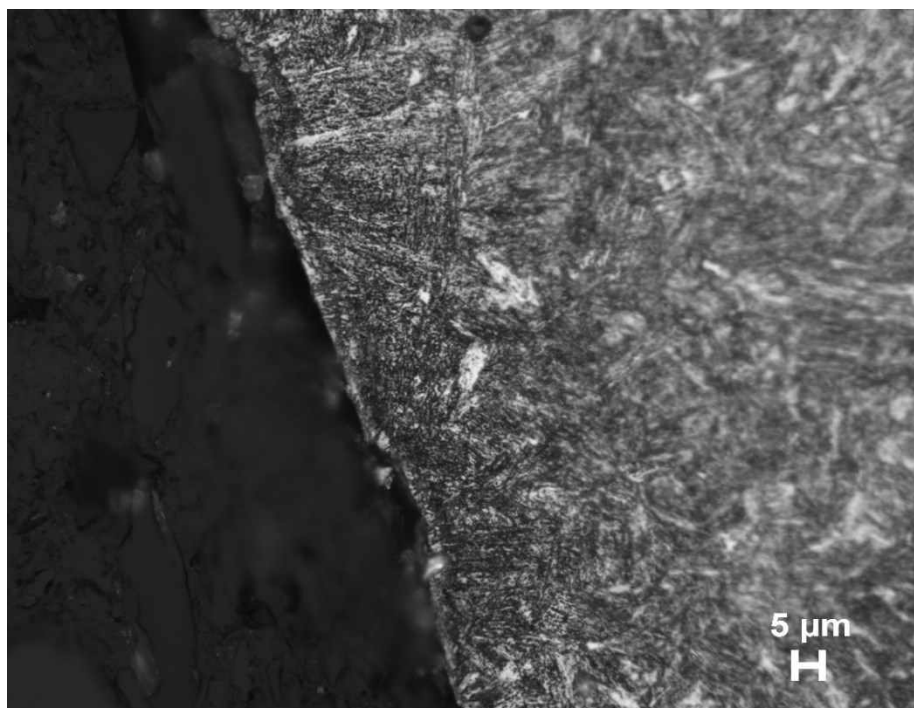


Figura A.21 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 21.

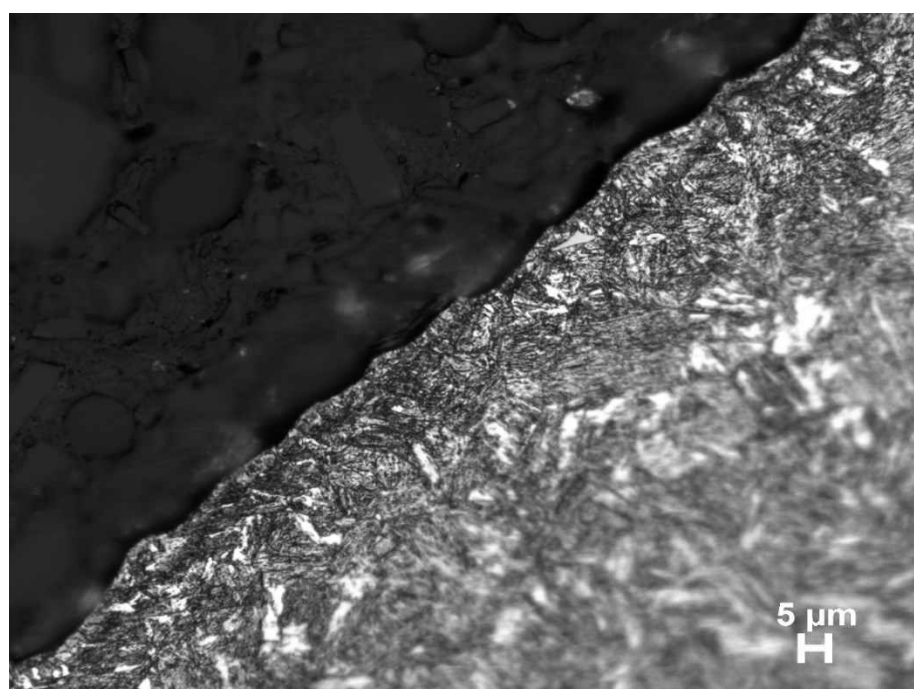


Figura A.22 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 22.

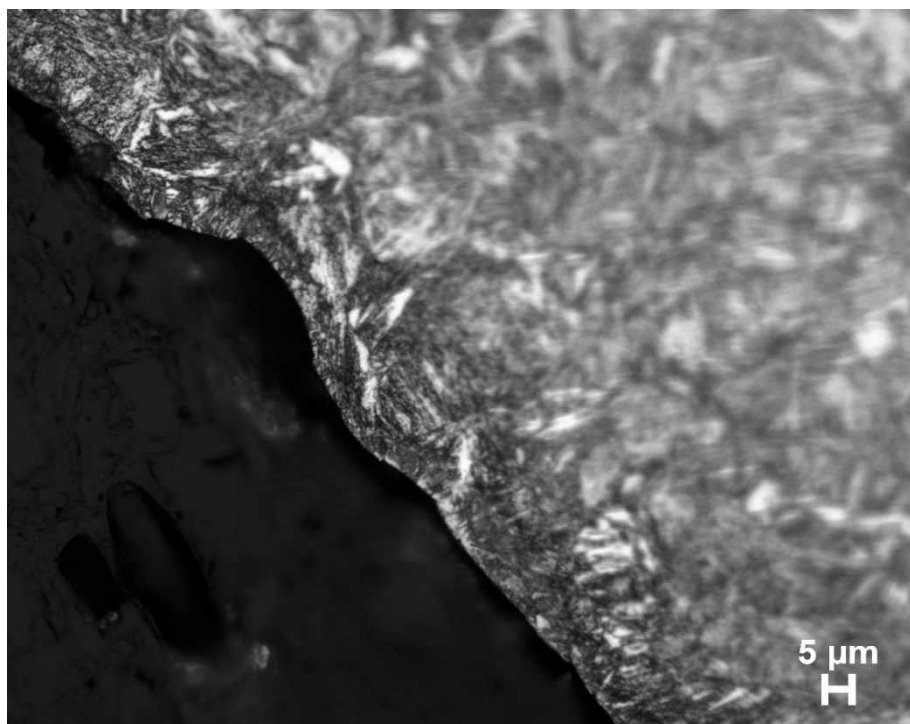


Figura A.23 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 23.

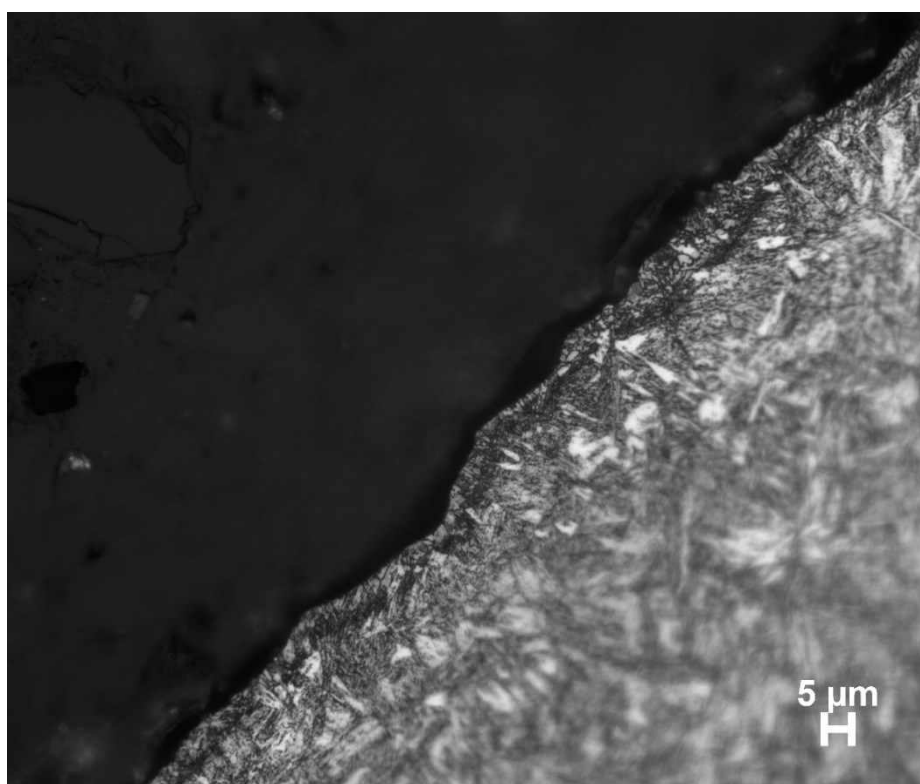


Figura A.24 - Fotomicrografia da camada refundida do corpo de prova 24.